



Diogo André Marques Pires

Licenciado em Ciências da Engenharia Civil

**Reabilitação de infraestruturas ferroviárias.
Aplicação de geogrelhas na camada de
balastro.**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Civil – Perfil Construção

Orientadora: Doutora Madalena Barroso, Investigadora
Auxiliar, Laboratório Nacional de Engenharia Civil

Co-Orientadora: Doutora Simona Fontul, Professora Auxiliar
Convidada, Faculdade de Ciências e Tecnologia da
Universidade Nova de Lisboa

Júri:

Presidente: Doutora Zuzana Dimitrovová, Professora Auxiliar, Faculdade de
Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa

Arguente: Doutora Maria da Graça Lopes, Professora Coordenadora
Principal, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa

Vogal: Doutora Simona Fontul, Professora Auxiliar Convidada, Faculdade de
Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Junho de 2018

Reabilitação de infraestruturas ferroviárias. Aplicação de geogrelhas na camada de balastro.

“Copyright” Diogo André Marques Pires, FCT/UNL e UNL.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa tem o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Agradecimentos

Sendo esta a secção mais pessoal deste trabalho, gostaria de agradecer a todas as pessoas que, direta ou indiretamente, contribuíram para a finalização desta etapa.

Em primeiro lugar, um grande obrigado às minhas orientadoras, as Engenheiras Madalena Barroso e Simona Fontul, por toda a orientação, a disponibilidade, a confiança, a boa disposição e a amizade ao longo deste trabalho. Agradeço, também a oportunidade de ter estagiado no Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) e pela possibilidade ter efetuado uma visita a uma obra ferroviária. Às minhas orientadoras, o meu forte agradecimento.

A todos os funcionários do Departamento de Transportes do LNEC, agradeço toda a ajuda e a atenção prestadas. Ao Rui Coelho agradeço, em especial, toda a disponibilidade prestada no decorrer dos ensaios experimentais, com o Defletómetro de Impacto Ligeiro. Ao Válder Nascimento, do Departamento de Geotecnia do LNEC, agradeço o auxílio na preparação das campanhas experimentais.

Ao Engenheiro José Pereira, das Infraestruturas de Portugal, agradeço o convite para visitar uma obra de renovação integral de via e por ter cedido as geogrelhas.

Aos meus amigos, Cláudia, Débora, Jeniffer, Jorge, Margarida, Miguel G., Miguel V., Sofia e Rita, o meu agradecimento pela amizade, pelo apoio e compreensão, por todas as gargalhadas e diversão que me proporcionaram no decorrer de todo o curso.

À Inês, agradeço toda a compreensão e paciência, especialmente ao longo do desenvolvimento deste trabalho.

Por fim, mas sempre em primeiro lugar no meu coração, agradeço à minha família. Muito obrigado por terem sempre acreditado em mim. Um muito obrigado à minha avó por todas as refeições preparadas, toda a simpatia e boa-disposição ao longo desta etapa. Ao meu irmão, Duarte, o meu agradecimento por todo o orgulho e admiração. Aos melhores pais do mundo, agradeço toda a espera por este momento, a compreensão do mau humor e todos os esforços feitos para a minha formação ao longo destes anos. Muito obrigado!!!

Do fundo do coração, um grande obrigado a todos!!!

Resumo

A reabilitação de vias férreas é uma das prioridades do Plano de Investimentos da Rede Ferroviária Nacional. Devido ao atual constrangimento económico, soluções que incluam a aplicação de geogrelhas representam alternativas que podem melhorar o comportamento da via.

Neste trabalho, efetuou-se uma revisão bibliográfica sobre a aplicação de geogrelhas na camada de balastro, que mostrou ser necessário existir uma relação apropriada entre a dimensão da abertura da malha da geogrelha (A) e a dimensão do agregado (D), por forma a que ocorra imbricamento e a geogrelha desempenhe a sua função.

Desenvolveu-se um caso de estudo, com os seguintes objetivos: (i) definir uma relação A/D que maximize o imbricamento, considerando a granulometria do balastro e a localização da geogrelha; (ii) estudar a influência da geogrelha no comportamento da camada de balastro; e (iii) propor recomendações de boas práticas construtivas que envolvam a aplicação de geogrelhas.

Foram considerados quatro modelos físicos, genericamente constituídos por uma camada de sub-balastro, uma geogrelha e uma camada de balastro. Estes modelos diferenciavam-se pela granulometria do balastro em contacto com a geogrelha e pela localização da geogrelha. Considerou-se, ainda, um modelo de referência, sem geogrelha.

Verificou-se que ocorreu uma melhoria da percentagem de imbricamento quando foi aplicada uma camada de balastro selecionado em contacto com a geogrelha, e que a melhoria foi mais significativa quando a geogrelha foi colocada entre duas camadas de balastro selecionado, a 45mm da interface balastro/sub-balastro. De forma a maximizar o imbricamento, a relação $A/D_{\text{máx}}$ deve ser aproximadamente de 1,22.

A influência da geogrelha no módulo de deformabilidade da camada de balastro, estudada com base no Defletómetro de Impacto Ligeiro, não foi evidente, sugerindo que o equipamento pode não ser adequado para esta análise.

Por fim, foram propostas algumas recomendações para a aplicação prática de geogrelhas na camada de balastro.

Termos-Chave: infraestruturas ferroviárias, balastro, geogrelha, estabilização, imbricamento, Defletómetro de Impacto Ligeiro

Abstract

Railway rehabilitation is a National Railway Network priority. Due to economic constraints, rehabilitation solutions including geogrids application represent efficient alternatives to improve the track behaviour.

In this work, a state of the art about the application of geogrids in the ballast layer was presented. It showed that an appropriate relationship between the size of the opening of the geogrid (A) and the size of the aggregate (D) is fundamental in order to exist interlock and for the geogrid to function properly.

A case study was developed with the following objectives: (i) to define an A/D ratio that maximizes the interlock, considering the ballast grading and the location of the geogrid; (ii) to study the influence of the geogrid on the ballast layer behaviour; and (iii) to suggest recommendations for practical application of geogrids in the ballast layer.

Four physical models were implemented and studied. They consisted of subballast layer, geogrid and ballast layer. They differed by the ballast grading in contact with the geogrid and by the location of the geogrid within the ballast layer. It was also used a reference model, without geogrid.

It was found that an improvement in the interlock occurred when a selected ballast layer was applied in contact with the geogrid. In addition, the interlock improvement was more significant when the geogrid was placed between two layers of selected ballast, 45 mm above the ballast/subballast interface. In order to maximize the interlock, the A/D_{\max} ratio is recommended to be approximately 1.22.

The influence of the geogrid on the deformability modulus of the ballast layer, obtained with the Light Falling Weight Deflectometer, was not evident, suggesting that the equipment may not be suitable for this analysis.

Finally, some recommendations were made for practical application of geogrids in the ballast layer.

Key-words: railway infrastructures, ballast, geogrid, stabilization, interlock, Light Falling Weight Deflectometer

ÍNDICE DE CONTEÚDOS

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Enquadramento.....	1
1.2. Objetivos.....	3
1.3. Estrutura do documento.....	3
2. A VIA FÉRREA BALASTRADA	5
2.1. Introdução	5
2.2. Elementos constituintes	5
2.2.1. Carril	6
2.2.2. Travessa.....	6
2.2.3. Camada de balastro	8
2.2.4. Camada de sub-balastro.....	11
2.2.5. Fundação	12
2.3. Solicitações da via férrea	12
2.3.1. Forças verticais	13
2.3.2. Forças laterais	14
2.3.3. Forças longitudinais	14
2.4. Manutenção e Reabilitação	14
2.4.1. Irregularidades da via	15
2.4.2. Técnicas de reabilitação	17
2.5. Considerações Finais	20
3. GEOSSINTÉTICOS.....	21
3.1. Introdução	21
3.2. Definição e composição.....	21
3.3. Classificação dos geossintéticos.....	21
3.3.1. Geotêxteis.....	22
3.3.2. Geogrelhas.....	22
3.3.3. Geocélulas.....	24
3.3.4. Georrede.....	24
3.4. Funções dos geossintéticos.....	25
3.4.1. Separação	25
3.4.2. Proteção.....	25
3.4.3. Filtragem	25
3.4.4. Drenagem	26
3.4.5. Contenção de líquidos/ gases.....	26
3.4.6. Controlo da erosão	27

3.4.7.	Reforço.....	27
3.4.8.	Estabilização.....	27
3.5.	Aplicação de geossintéticos em ferrovias	28
3.6.	Geogrelhas	30
3.6.1.	Propriedades	30
3.6.2.	Mecanismos de funcionamento da geogrelha	35
3.7.	Considerações finais	36
4.	ESTADO DO CONHECIMENTO SOBRE A APLICAÇÃO DE GEOGRELHAS NA CAMADA DE BALASTRO	37
4.1.	Introdução	37
4.2.	Metodologias adotadas e tópicos estudados	37
4.3.	Análise dos resultados relatados na bibliografia	41
4.3.1.	Generalidades	41
4.3.2.	Assentamento da camada de balastro	42
4.3.3.	Deslocamento horizontal do balastro e resistência lateral da via	44
4.3.4.	Esforços na interface	45
4.3.5.	Deformabilidade vertical da via	45
4.3.6.	Deflexão do carril	46
4.3.7.	Fragmentação do balastro	46
4.3.8.	Síntese dos resultados analisados	47
4.4.	Interação balastro-geogrelha	49
4.4.1.	Influência da localização da geogrelha	49
4.4.2.	Influência da presença de um geotêxtil adicional	50
4.4.3.	Relação entre a dimensão da abertura da geogrelha e a dimensão do balastro	51
4.5.	Considerações finais	54
5.	CASO DE ESTUDO	57
5.1.	Introdução	57
5.2.	Materiais e equipamentos.....	57
5.2.1.	Modelos físicos	57
5.2.2.	Balastro	60
5.2.3.	Sub-balastro	61
5.2.4.	Geogrelha	62
5.2.5.	Defletómetro de Impacto Ligeiro	62
5.3.	Procedimento de ensaio	63
5.4.	Resultados obtidos	66
5.4.1.	Ensaio para a seleção do balastro (Fase 1)	66
5.4.2.	Ensaio em modelos físicos (Fase 2)	67
5.5.	Adequabilidade da utilização do DIL	70

5.6.	Relação entre a dimensão da abertura da geogrelha e a dimensão do balastro (A/D)	72
5.7.	Recomendações de boas práticas na utilização de geogrelhas na camada de balastro	73
5.8.	Considerações finais	73
6.	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS.....	75
	REFERÊNCIAS	79
	ANEXOS.....	85
	ANEXO 1 – Considerações gerais sobre os tópicos analisados no estado do conhecimento	87
	ANEXO 2 – Caracterização do balastro	93
	ANEXO 3 – Defletómetro de Impacto Ligeiro	97
	ANEXO 4 – Pormenores do procedimento de ensaio.....	101
	ANEXO 5 – Partículas imbricadas nos modelos de ensaio	103
	ANEXO 6 – Valores obtidos com o DIL	105

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – Corte longitudinal da via balastrada (adaptado de Fortunato, 2005).	5
Figura 2.2 – Corte transversal da via balastrada (Fortunato, 2005).	6
Figura 2.3 – Carril.	6
Figura 2.4 – Travessas de madeira.	7
Figura 2.5 – Travessas de betão (Moreira, 2014).	7
Figura 2.6 – Travessas metálicas (Moreira, 2014).	7
Figura 2.7 – Tipos de travessas de betão (Vale, 2010).	7
Figura 2.8 – Distribuição da carga estática nas travessas (Vale, 2010).	8
Figura 2.9 – Balastro.	8
Figura 2.10 – Contaminação do balastro (Fortunato, 2005).	10
Figura 2.11 – Origens da contaminação do balastro (adaptado de Selig, 1994).	10
Figura 2.12 – Assentamento da via (adaptado de Selig, 1994).	10
Figura 2.13 – Distribuição do carregamento na via férrea (adaptado de Selig, 1994).	13
Figura 2.14 – Tensões em cada camada da via férrea balastrada (adaptado de Esveld, 2001).	13
Figura 2.15 – Forças atuantes na via férrea.	14
Figura 2.16 – Atacadeira.	18
Figura 2.17 – Atacadeira: a) entrada dos pioches na camada de balastro; b) colocação de balastro sob a travessa e a sua vibração (adaptado de Selig, 1994).	18
Figura 2.18 – Depuradora de balastro.	19
Figura 2.19 – Substituição integral da via.	19
Figura 3.1 – Grupos de geossintéticos.	22
Figura 3.2 – Amostra de geotêxtil não tecido.	22
Figura 3.3 – Geogrelha uniaxial (Pinto, 2005).	23
Figura 3.4 – Geogrelha biaxial (Pinto, 2005).	23
Figura 3.5 – Geogrelha triaxial.	23
Figura 3.6 – Constituição de uma geogrelha triaxial (adaptado de Kawalec, 2017).	24
Figura 3.7 – Geocélulas (Ecosalix, 2017).	24
Figura 3.8 – Georrede (TEGAPE, 2017).	24
Figura 3.9 – Geossintético de separação (Gomes, 2001).	25
Figura 3.10 – Geossintético de proteção (adaptado de Maccaferri, 2017).	25
Figura 3.11 – Geossintético de filtragem (Gomes, 2001).	26
Figura 3.12 – Geossintético de drenagem (Gomes, 2001).	26
Figura 3.13 – Geossintético de contenção de gases e líquidos (IGS – Portugal, 2017b).	26
Figura 3.14 – Geossintético de controlo da erosão (Ecosalix, 2017).	27
Figura 3.15 – Geossintético de reforço (EN ISO 10318-2).	27
Figura 3.16 – Função de reforço (Kawalec, 2017).	27
Figura 3.17 – Função de estabilização (Kawalec, 2017).	28
Figura 3.18 – Geossintéticos num projeto ferroviário (IGS – Portugal, 2017c).	29
Figura 3.19 – Drenagem transversal da via férrea (adaptado de Selig, 1994).	29
Figura 3.20 – Direções de ensaio para uma a) geogrelha uniaxial e uma b) geogrelha biaxial.	31
Figura 3.21 – Direções de ensaio para uma geogrelha triaxial.	32
Figura 3.22 – Curva tensão-extensão típica, com a rigidez secante (Carneiro, 2009).	33
Figura 3.23 – Ensaio com uma barra isolada (EOTA TR041, 2012).	34
Figura 3.24 – Ensaio com uma junção isolada (EOTA TR041, 2012).	34
Figura 3.25 – Direções de ensaio para a determinação da eficiência das junções (EOTA TR041, 2012).	34
Figura 3.26 – Mecanismo de imbricamento (Tensar – Railway, 2012).	35
Figura 3.27 – Mecanismo de confinamento (adaptado de Kawalec, 2017).	35
Figura 3.28 – Magnitude do efeito de confinamento (adaptado de Kawalec, 2017).	36
Figura 4.1 – Metodologias usadas para estudar o comportamento da camada de balastro com a introdução de geogrelhas e a interação balastro/geogrelha.	38
Figura 4.2 – a) equipamento triaxial prismoidal e b) ensaio à escala real.	38
Figura 4.3 – a) ensaio de corte direto e b) ensaio de arrancamento.	39
Figura 4.4 – Localização da interface.	41
Figura 4.5 – Melhorias do assentamento da camada de balastro.	43
Figura 4.6 – Melhorias do deslocamento horizontal do balastro.	44
Figura 4.7 – Melhoria nos esforços na interface.	45
Figura 4.8 – Melhorias obtidas na deflexão do carril.	46
Figura 4.9 – Melhorias obtidas na fragmentação do balastro.	47

Figura 4.10 – Influência da presença de um geocompósito no assentamento.	51
Figura 4.11 – Importância da dimensão da dimensão do agregado e da dimensão da abertura da geogrelha (Han et al., 2017).	52
Figura 4.12 – Ensaio de arrancamento para uma força vertical de 0,5kN (adaptado de Kwan, 2006).	53
Figura 4.13 – Variação de α com o índice A/D_{50}	54
Figura 5.1 – Análise granulométrica do balastro utilizado e fusos granulométricos normativos.	60
Figura 5.2 – Análise granulométrica do sub-balastro.	61
Figura 5.3 – Geogrelha utilizada.	62
Figura 5.4 – a) PRIMA 100 LWD; b) placa extra.	63
Figura 5.5 – Fossa de ensaio.	63
Figura 5.6 – Gráfico-tipo obtido com o DIL no topo do balastro, no modelo #GT120/0.	64
Figura 5.7 – Sequência dos ensaios.	65
Figura 5.8 – Análise granulométrica do balastro imbricado no modelo GT120/0, do balastro com granulometria selecionada e do balastro com granulometria especificada no IT.GEO.001 (2004).	66
Figura 5.9 – Exemplo de partículas imbricadas no modelo GT120/0.	67
Figura 5.10 – Exemplos de partículas imbricadas nos modelos ensaiados na fase 2.	68
Figura 5.11 – Módulos de deformabilidade obtidos com o DIL.	69
Figura 5.12 – Zona de contacto entre a placa de carga e a superfície da camada de balastro (Hornicek e Brestovsky, 2014).	71
Figura A 1 – Assentamento da camada de balastro.	87
Figura A 2 – Deslocamento horizontal do balastro.	89
Figura A 3 – Fragmentação do balastro (adaptado de Interchange 2014).	91
Figura A 4 – Cálculo do BBI (adaptado de Indraratna et al., 2009).	91
Figura A 5 – Verificação da condição $L/3$	93
Figura A 6 – Peneiros de barras.	94
Figura A 7 – Medição do comprimento da partícula.	95
Figura A 8 – Sequência do ensaio de resistência à fragmentação.	96
Figura A 9 – Principais componentes do DIL.	98
Figura A 10 – Geofone central.	98
Figura A 11 – Colocação da geogrelha na interface.	101
Figura A 12 – Colocação da geogrelha na interface e das camadas de balastro com diferentes granulometrias.	101
Figura A 13 – Camadas de balastro selecionado no modelo #GT120/45_1.	101
Figura A 14 – Camada de balastro selecionado no modelo #GT120/45_2.	101
Figura A 15 – Ensaio com o DIL no topo da camada de balastro.	101
Figura A 16 – Partículas imbricadas no modelo GT120/0.	103
Figura A 17 – Partículas imbricadas no modelo #GT120/0.	103
Figura A 18 – Partículas imbricadas no modelo #GT120/45_1.	104
Figura A 19 – Partículas imbricadas no modelo #GT120/45_2.	104

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 1.1 – Principais constrangimentos do setor ferroviário (PETI3+, 2014).	1
Quadro 1.2 – Características da rede ferroviária nacional em 2013 e em 2020/2022 (PETI3+, 2014).	2
Quadro 2.1 – Tolerâncias permitidas para cada parâmetro geométrico (IT.VIA.018, 2009).	16
Quadro 2.2 – Níveis de qualidade da via em função dos desvios padrão (Fontul, 2016).	17
Quadro 3.1 – Polímeros mais utilizados nos geossintéticos (Pinto, 2005).	21
Quadro 3.2 – Estabilização e reforço (adaptado de Kawalec, 2017).	28
Quadro 3.3 – Quadro resumo da função principal dos geossintéticos (adaptado de Koerner, 1998).	28
Quadro 4.1 – Tópicos estudados e respectivos ensaios.	39
Quadro 4.2 – Forma e dimensões das aberturas da malha das geogrelhas estudadas e as respectivas referências.	40
Quadro 4.3 – Condições do balastro e da camada de balastro estudadas com a colocação de geogrelhas e respectivas referências.	41
Quadro 4.4 – Nomenclatura utilizada para identificar as geogrelhas e a sua localização no balastro.	42
Quadro 4.5 – Quadro resumo das melhorias com a aplicação de geogrelhas na camada de balastro.	48
Quadro 4.6 – Melhorias tendo em conta o tipo de balastro e as condições da camada de balastro com a aplicação de geogrelhas.	48
Quadro 4.7 – Influência da localização da geogrelha.	49
Quadro 5.1 – Modelos físicos ensaiados.	59
Quadro 5.2 – Resumo da caracterização do balastro utilizado.	61
Quadro 5.3 – Características da geogrelha utilizada (ETA12/0530, 2012).	62
Quadro 5.4 – Quantificação do imbricamento no modelo GT120/0.	66
Quadro 5.5 – Análise do imbricamento.	67
Quadro 5.6 – Valores da deflexão obtidos com o DIL, para as últimas cinco quedas.	68
Quadro 5.7 – Análise da relação A/D.	72
Quadro 5.8 – Relação A/D.	72
Quadro A 1 – Constantes a e b para o cálculo do assentamento.	88
Quadro A 2 – Alterações introduzidas pelo Anexo C da NP EN 13450.	95
Quadro A 3 – Especificações técnicas do PRIMA 100 LWD (Manual do utilizador: PRIMA 100 LWD).	99
Quadro A 4 – Valores obtidos com o DIL.	105

Abreviaturas e símbolos utilizados

O significado das abreviaturas e dos símbolos utilizados neste trabalho é descrito ao longo do texto, apresentando-se, de seguida, os principais.

Abreviaturas utilizadas

DIL – Defletómetro de Impacto Ligeiro;
EN – European Standards;
EOTA – European Organization for Technical Assessment;
IGS – International Geosynthetics Society;
ISO – International Organization for Standardization;
NP – Norma Portuguesa.

Símbolos utilizados

A – Dimensão da abertura da malha da geogrelha;
A/D – Relação genérica entre a dimensão da abertura da malha da geogrelha e a dimensão do balastro;
A/D_{máx} – Relação entre a dimensão da abertura da malha da geogrelha e a máxima dimensão do balastro;
A/D₅₀ – Relação entre a dimensão da abertura da malha da geogrelha e a dimensão média do balastro;
TB – Topo da camada de balastro;
BBI – Ballast Breakage Index (em inglês);
TBI – Topo da camada de balastro imbricado;
D – Dimensão genérica do agregado/ balastro;
D₅₀ – Dimensão média do agregado/ balastro;
D_{máx} – Máxima dimensão do agregado/ balastro;
D_{min} – Mínima dimensão do agregado/ balastro;
E_{eq} – Módulo de deformabilidade equivalente;
LA_{RB} – Coeficiente de Los Angeles do balastro;
M – Melhoria do parâmetro;
S – Assentamento;
TSB – Topo da camada de sub-balastro;
 α – Coeficiente de eficiência de resistência ao corte.

1. INTRODUÇÃO

1.1. ENQUADRAMENTO

Com o aparecimento da máquina a vapor durante a Revolução Industrial Inglesa (1760) e a necessidade de transportar minérios para as indústrias, a primeira via férrea surgiu em Inglaterra em 1825, fazendo a ligação entre Stockton e Darlington. Em Portugal, surgiu a 28 de Outubro de 1856, fazendo a ligação entre Lisboa e o Carregado (Guerreiro, 2016).

A camada de balastro é a camada que mais pesa no orçamento de uma via férrea e é a que está sujeita a maiores esforços. A sua degradação leva a alterações de granulometria e aparecimento de finos que afetam o correto funcionamento da via. Com o aumento das velocidades de circulação e das solicitações, torna-se importante encontrar soluções que melhorem o seu comportamento e que vão ao encontro da segurança. As tolerâncias das características geométricas da via férrea e da sua deformação são bastante exigentes, sendo da ordem dos milímetros (IT.VIA.018, 2009).

No contexto português, o Plano Estratégico dos Transportes e Infraestruturas 2014-2020 (PETI3+) estabelece um quadro de orientações para o setor dos transportes, com destaque para os investimentos na infraestrutura ferroviária na ordem dos 2 639 milhões de euros (PETI3+, 2014). O Quadro 1.1 apresenta os principais constrangimentos do setor ferroviário e o respetivo grau de prioridade.

Quadro 1.1 – Principais constrangimentos do setor ferroviário (PETI3+, 2014).

Constrangimento	Grau de prioridade
Vida útil e obsolescência técnica	!!!
Ausência de eletrificação	!!!
Falta de ligação eficiente dos principais portos e centros logísticos à europa	!!!
Falta de ligação eficiente aos portos, plataformas logísticas e polos industriais	!!!
Limitação do comprimento e peso máximo dos comboios	!!
Bitola, sinalização e sistemas de alimentação heterogéneos	!!
Limitações de capacidade	!
Falta de interface com rodovias e aeroportos	!

Legenda: !!! – prioridade máxima; !! – prioridade intermédia; ! – prioridade baixa

O Plano de Investimentos da Rede Ferroviária Nacional apresenta como intervenções prioritárias a construção de novos troços de ligações ferroviárias e a modernização e reabilitação das infraestruturas existentes, aumentando a sua eficiência e qualidade do serviço. É apontado como ponto fraco da via férrea portuguesa a degradação da infraestrutura existente, conduzindo a uma limitação da capacidade, afrouxamentos e reduções de velocidade (PETI3+, 2014). O Quadro 1.2 apresenta as características da rede ferroviária nacional em 2013 e as previsões para 2020/2022.

Quadro 1.2 – Características da rede ferroviária nacional em 2013 e em 2020/2022 (PETI3+, 2014).

	2013		2020/2022	
	Extensão (km)	%	Extensão (km)	%
Rede Ferroviária Nacional *	2 429	100	2 582	100
Rede Eletrificada	1 629	67	2 370	92
Rede com sistema de sinalização eletrônica e elétrica	1 740	72	2 288	89
Rede com sistema de sinalização mecânica	689	28	294	11
Rede com sistema de controlo de velocidade	1 516	62	1 431	55
Rede com sistema ETCS ⁽¹⁾ emulado com sistema nacional	147	6	704	27
Rede com sistema ETCS ⁽¹⁾	0	0	377	15
Rede com sistema de telecomunicações rádio solo-comboio	1 506	62	1 506	58
Rede com sistema GSM-R ⁽²⁾	0	0	486	19

*excluindo a rede de bitola ibérica (112km); ⁽¹⁾ Sistema Europeu de Controlo dos Comboios; ⁽²⁾ Global System for Mobile Communications Railway

Até 2050, prevê-se uma rede ferroviária pertencente à Rede Transeuropeia de Transportes (RTE-T) totalmente eletrificada, com capacidade para circulação de comboios de mercadorias, com maiores comprimentos e cargas, e em bitola europeia (PETI3+, 2017).

Assim sendo, e dada a importância do transporte ferroviário e a necessidade de reabilitação de vias existentes, soluções como a aplicação de geossintéticos representam opções a incluir na reabilitação.

Os geossintéticos têm sido aplicados nas vias férreas desde os anos 70 e a sua utilização está bem presente num projeto ferroviário, quer seja na estabilização de taludes, na separação de materiais com granulometrias diferentes, na drenagem, na filtragem e no reforço e/ou estabilização da camada de balastro. De destacar a utilização de geogrelhas com a função de reforço e/ou estabilização de diferentes materiais granulares.

A questão do reforço *versus* estabilização reveste-se, ainda, de grande atualidade. Por exemplo, no final do ano de 2017, a *International Geosynthetic Society* (IGS) criou um grupo de trabalho dedicado ao tema da estabilização. Em ambas as funções, os geossintéticos proporcionam uma melhoria no comportamento mecânico dos materiais onde são aplicados. Contudo, as propriedades relevantes para assegurar o desempenho destas funções são diferentes. Para o reforço, a resistência à tração e a extensão na rotura são as mais importantes, enquanto que para a estabilização é a abertura da malha da geogrelha.

Vários autores estudaram a aplicação de geogrelhas na camada de balastro, concluindo que a aplicação de geogrelhas na camada de balastro melhora o comportamento desta camada em termos de, por exemplo, assentamento, fragmentação e movimentação das partículas. Os estudos realizados revelam que, para a geogrelha desempenhar as funções requeridas, é necessário que exista uma relação apropriada entre a dimensão da abertura da malha da geogrelha (A) e a dimensão do agregado (D), isto é, um bom imbricamento. Contudo, esta relação ainda não é clara, visto que os materiais e agregados utilizados pelos autores diferem entre si, pelo que a relação A/D carece, ainda, de estudos, sobretudo,

tendo em conta os materiais utilizados nas infraestruturas férreas portuguesas, isto é, o tipo de geogrelhas aplicadas e as dimensões do balastro utilizado.

1.2. OBJETIVOS

O trabalho desenvolvido ao longo desta dissertação tem como objetivos:

- i) Analisar a bibliografia mais recente sobre a aplicação de geogrelhas na camada de balastro, com vista a fazer uma síntese do estado do conhecimento sobre o tema;
- ii) Definir uma relação entre a dimensão da abertura da geogrelha e a dimensão do balastro (A/D) que maximize o imbricamento, considerando a granulometria do balastro e a localização da geogrelha;
- iii) Estudar a influência da geogrelha no comportamento da camada de balastro;
- iv) Propor recomendações de boas práticas construtivas, envolvendo a aplicação de geogrelhas na camada de balastro.

1.3. ESTRUTURA DO DOCUMENTO

Este trabalho está organizado em 6 capítulos.

O presente capítulo, o Capítulo 1, trata o enquadramento do trabalho, os objetivos e a estrutura do documento.

No Capítulo 2 é descrita a via férrea balastrada, nomeadamente os elementos constituintes, as solicitações atuantes e as principais ações de manutenção e reabilitação deste tipo de vias. Este capítulo aborda, também, a contaminação da camada de balastro e os documentos normativos aplicados ao balastro.

O Capítulo 3 refere-se aos geossintéticos, em termos da sua composição, classificação e funções. É feita, ainda, referência à aplicação de geossintéticos em ferrovias. Neste capítulo, são, também, apresentadas as principais propriedades físicas e mecânicas e os mecanismos de funcionamento das geogrelhas.

O Capítulo 4 inclui a revisão bibliográfica sobre a aplicação de geogrelhas como reforço e/ou estabilização da camada de balastro, com vista a fazer uma síntese do estado do conhecimento sobre este assunto. São mencionadas as metodologias utilizadas pelos diversos autores, para avaliar o comportamento desta camada com a colocação de geogrelhas. Inclui, também, os principais tópicos que têm sido estudados e a análise dos resultados relatados pelos diferentes autores, em termos de melhorias do comportamento da camada de balastro com a aplicação de geogrelhas. É analisada a interação entre a geogrelha e o balastro, nomeadamente a influência da localização da geogrelha na camada de balastro, a presença de um geotêxtil adicional e a relação entre a dimensão da abertura da malha da geogrelha e a dimensão do balastro.

O Capítulo 5 apresenta o caso de estudo. Este capítulo apresenta os modelos físicos estudados, os materiais e os equipamentos utilizados, o procedimento de ensaio, os resultados obtidos e a sua

discussão. É analisado o imbricamento das partículas de balastro nas aberturas da geogrelha, com vista a definir uma relação entre a dimensão da abertura da geogrelha e a dimensão do balastro (A/D) que maximize o imbricamento, considerando a granulometria do balastro e a localização da geogrelha. É também estudada a influência da aplicação de geogrelhas no comportamento da camada de balastro. Por fim, são apresentadas algumas recomendações de boas práticas construtivas, envolvendo a aplicação de geogrelhas na camada de balastro.

O Capítulo 6 apresenta as principais conclusões deste trabalho e algumas propostas para trabalhos futuros.

O trabalho inclui, ainda, seis anexos:

ANEXO 1: Considerações gerais sobre os tópicos analisados no estado do conhecimento;

ANEXO 2: Caracterização do balastro;

ANEXO 3: Defletómetro de Impacto Ligeiro;

ANEXO 4: Pormenores do procedimento de ensaio;

ANEXO 5: Partículas imbricadas nos modelos de ensaio;

ANEXO 6: Valores obtidos com o DIL.

2. A VIA FÉRREA BALASTRADA

2.1. INTRODUÇÃO

A via férrea tem como objetivo o transporte de pessoas e mercadorias de forma segura, económica e confortável.

A via férrea balastrada caracteriza-se por ter menores custos de construção quando comparada com uma via em placa, assente sobre uma laje de betão armado ou de betão betuminoso. Contudo, a sua estabilidade transversal é mais limitada, visto que a resistência lateral da camada de balastro é reduzida. A sua espessura e a sua área de ocupação são também maiores, quando comparadas com uma via em placa (Fontul, 2016).

A via balastrada requer manutenção frequente com vista a manter os requisitos de qualidade geométrica, que pode ser realizada com recurso a equipamentos automáticos. Este tipo de via tem um bom comportamento dinâmico e o seu comportamento depende, essencialmente, da sua qualidade. (Fortunato, 2005).

Este capítulo apresenta uma descrição sobre a constituição da via férrea balastrada, as solicitações atuantes e as principais ações de manutenção e reabilitação deste tipo de vias. Faz-se referência, também, à contaminação da camada de balastro e aos documentos normativos aplicados ao balastro.

2.2. ELEMENTOS CONSTITUINTES

Como em qualquer infraestrutura de transportes, a função geral das diversas camadas constituintes é a transmissão dos esforços desde os rodados até ao solo de fundação. A Figura 2.1 e a Figura 2.2 apresentam a constituição da via férrea balastrada quer em corte longitudinal, quer em corte transversal, respetivamente.

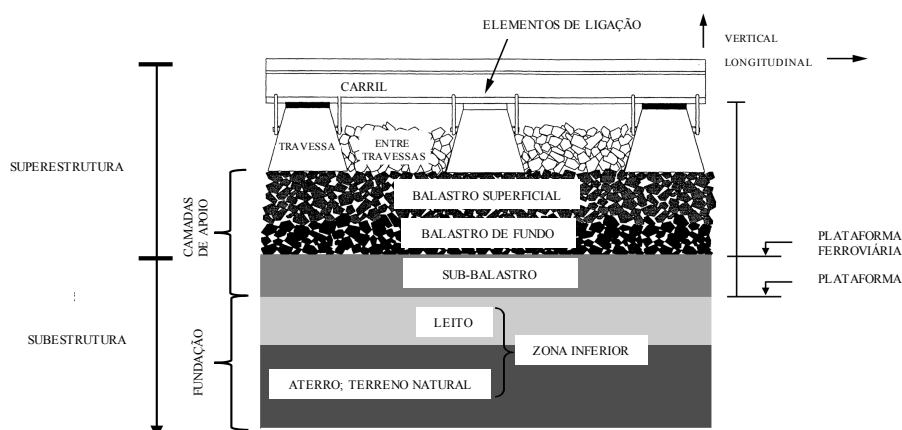


Figura 2.1 – Corte longitudinal da via balastrada (adaptado de Fortunato, 2005).

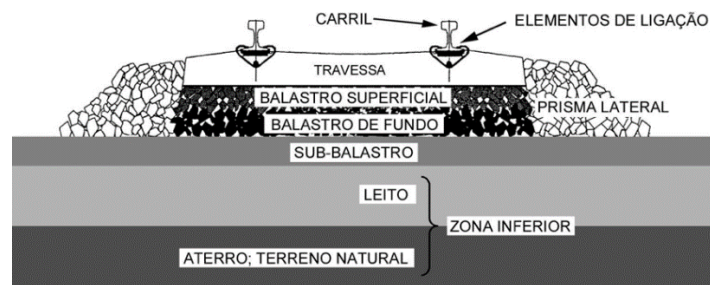


Figura 2.2 – Corte transversal da via balastrada (Fortunato, 2005).

Conforme apresentado na Figura 2.1, a via é constituída pela superestrutura e pela subestrutura. A superestrutura é composta pelo carril, pelas travessas, pelas fixações e pela camada de balastro. A subestrutura é constituída pela camada de sub-balastro, pelo leito da via e pelo aterro/ solo de fundação.

As secções seguintes apresentam uma descrição mais detalhada dos principais elementos constituintes deste tipo de vias.

2.2.1. Carril

Os carris (Figura 2.3) são elementos de aço que têm como função resistir às cargas e esforços induzidos pelo tráfego e transmitir essas mesmas cargas aos outros elementos, nomeadamente às travessas. Têm, também, como função guiar os rodados e conduzir energia elétrica (Fontul, 2016).



Figura 2.3 – Carril.

2.2.2. Travessa

As travessas são elementos transversais à via e têm como função distribuir as cargas verticais e horizontais ao balastro. É nas travessas onde os carris são fixados, permitindo manter a bitola e a inclinação transversal do carril (Fontul, 2016).

Quanto ao material, podem ser de madeira (Figura 2.4), betão (Figura 2.5) ou metálicas (Figura 2.6) contudo, todas elas têm de isolar eletricamente o carril.



Figura 2.4 – Travessas de madeira.



Figura 2.5 – Travessas de betão (Moreira, 2014).



Figura 2.6 – Travessas metálicas (Moreira, 2014).

Atualmente, as travessas mais utilizadas são de betão e podem ser do tipo bibloco ou monobloco (Figura 2.7).

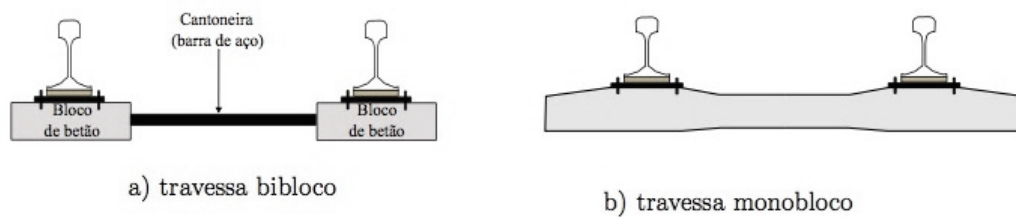


Figura 2.7 – Tipos de travessas de betão (Vale, 2010).

Face às tradicionais travessas de madeira, as travessas de betão apresentam uma maior durabilidade, melhor estabilidade e resistência lateral, menor manutenção, maior facilidade de serem recicladas e não necessitam de tratamentos químicos adicionais. Contudo, são mais difíceis de manusear (FIB, 2006).

A Figura 2.8 mostra a distribuição do carregamento nas travessas quando é aplicada uma carga estática.

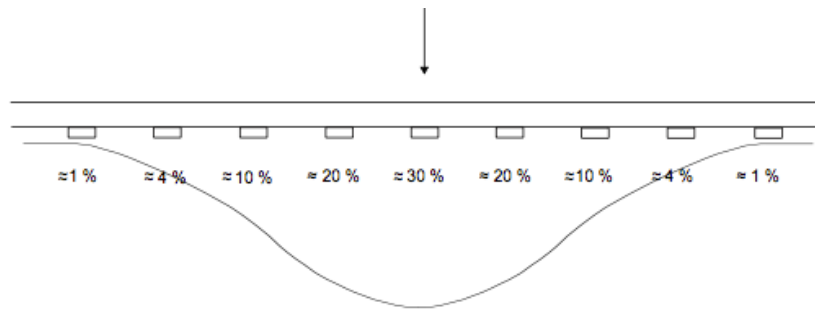


Figura 2.8 – Distribuição da carga estática nas travessas (Vale, 2010).

Verifica-se que ocorre uma distribuição da carga pelas várias travessas. Estes valores dependem da flexibilidade da via e da sua estabilidade (Vale, 2010).

2.2.3. Camada de balastro

A camada de balastro (Figura 2.9) é a camada na qual as travessas estão apoiadas.

Esta camada caracteriza-se por ser constituída por um material não coesivo, formado por partículas angulosas com elevado ângulo de atrito interno e por ter uma elevada resistência à fragmentação e ao desgaste.



Figura 2.9 – Balastro.

Esta camada é uma das mais importantes no que diz respeito à estabilidade horizontal e vertical da via. Verticalmente, a sua resistência é garantida pela resistência da própria partícula de balastro e lateral e longitudinalmente, a sua resistência deve-se, principalmente, ao atrito entre as várias partículas de balastro, entre estas e as travessas e ao seu imbricamento (Fortunato, 2005).

A padronização do seu comportamento é difícil devido à existência de diversas condicionantes e variáveis, destacando-se, por exemplo, as suas características mecânicas, a sua espessura, a sua compactação e as características intrínsecas às partículas (forma, dureza e dimensões, por exemplo). Também a frequência e o tipo dos trabalhos de manutenção e as características do material circulante dificultam a padronização do seu comportamento (Fortunato, 2005).

As principais funções da camada de balastro são as seguintes (Fortunato, 2005; Fontul, 2016):

- Resistir às ações verticais, longitudinais e laterais aplicadas às travessas e servir de apoio, garantindo o correto alinhamento da via;
- Confinar as travessas;
- Minimizar e uniformizar as tensões transmitidas às camadas subjacentes;
- Absorver as vibrações;
- Permitir a drenagem de águas pluviais e de materiais poluentes provenientes do material circulante;
- Evitar o aparecimento de vegetação;
- Facilitar as ações de manutenção e conservação da via (alinhamento e nivelamento).

2.2.3.1. Contaminação e degradação do balastro

No decorrer da vida útil do balastro, as funções, anteriormente mencionadas, podem ficar comprometidas devido à sua degradação. A degradação desta camada pode-se dever a diversos fatores, nomeadamente (Fontul, 2016):

- Tráfego – o impacto das travessas no balastro, devido à onda de avanço dos rodados, pode levar ao seu esmagamento e à sua fragmentação;
- Trabalhos de conservação – o próprio ataque mecânico pesado da via propicia o desgaste do balastro;
- Contaminação com finos de cima para baixo – deve-se, essencialmente, às condições climáticas (transporte de poeiras ou folhas pelo vento e arraste de material pelas águas da chuva) e à contaminação a partir de material transportado pelos comboios de mercadorias;
- Contaminação com finos de baixo para cima – ocorre quando não existe uma camada separadora entre o sub-balastro e o balastro ou, quando existe, não está operacional (ascensão de lamas).

A Figura 2.10 apresenta as várias formas de contaminação e a Figura 2.11 apresenta a origem da contaminação do balastro, observando-se que a principal origem é da própria camada de balastro e da camada subjacente.

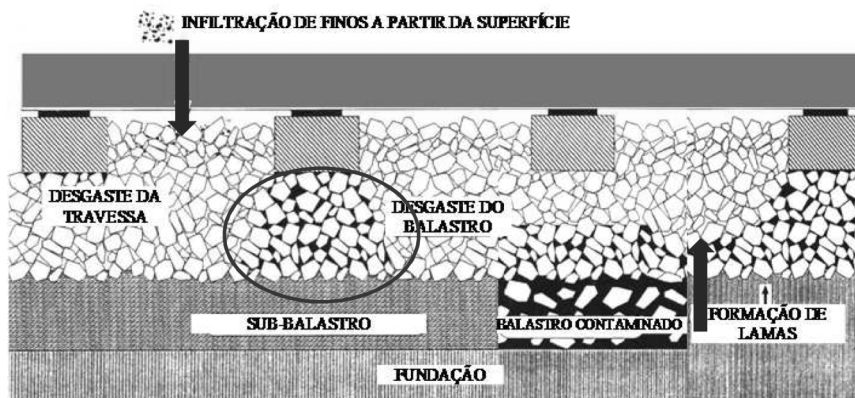


Figura 2.10 – Contaminação do balastro (Fortunato, 2005).

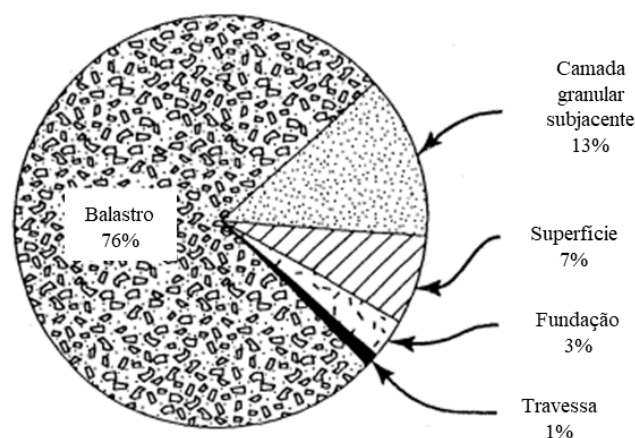


Figura 2.11 – Origens da contaminação do balastro (adaptado de Selig, 1994).

Huang et al. (2009) verificaram que a máxima resistência ao corte do balastro ocorre quando não existe contaminação e que, quanto mais contaminado estiver, mais reduzida é esta resistência devido à diminuição da fricção entre as partículas. A presença de água piora, ainda mais, esta resistência, ao funcionar como um lubrificante (Tutumluer et al., 2008).

Observa-se pela Figura 2.12 que a degradação da camada de balastro é a que mais contribui para o assentamento da via.

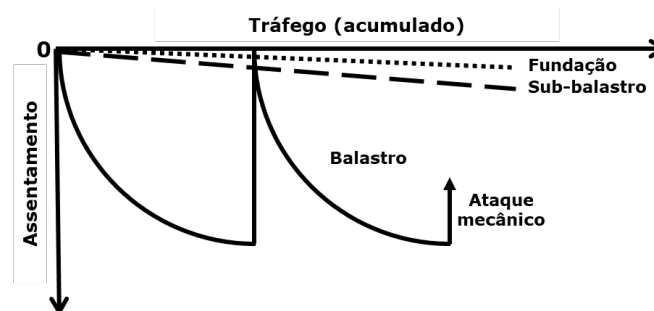


Figura 2.12 – Assentamento da via (adaptado de Selig, 1994).

2.2.3.2. Documentos normativos

Em termos normativos, a norma NP EN 13450 faz uma classificação dos materiais para balastro, tendo por base requisitos geométricos e físicos.

Em relação aos requisitos geométricos, classifica o balastro tendo em conta a sua dimensão, definindo uma dimensão máxima de 63mm e uma dimensão mínima de 31,5mm. Também faz uma classificação tendo em conta a granulometria, a percentagem de partículas finas e a percentagem de finos. Em termos de forma, classifica-o com base no índice de achatamento, no índice de forma e no comprimento das partículas.

Em termos de requisitos físicos, esta norma classifica o balastro tendo em conta a sua resistência mecânica à fragmentação (coeficiente de Los Angeles), ao desgaste por atrito (ensaio Micro Deval) e à durabilidade (resistência ao gelo/ degelo, massa volúmica, absorção de água e *Sonnenbrand*, que se caracteriza pelo surgimento de manchas brancas ou cinzentas a partir das quais se formam fissuras radiais, e a presença de elementos prejudiciais).

Em Portugal, de acordo com o documento técnico IT.GEO.001 (2004), para se obter um balastro de boa qualidade, este deve ser obtido a partir de rocha dura e sã. Quando britadas, estas devem ter uma forma angulosa, um elevado peso volúmico, uma elevada resistência ao desgaste, ao esmagamento e ao choque, uma superfície rugosa e uma elevada resistência aos agentes atmosféricos, dando-se preferência aos agregados de origem ígnea (basaltos e granitos).

Este documento define, ainda, dois tipos de balastro: o Tipo I, para sistemas ferroviários de alta velocidade e velocidade alta, e o Tipo II, para a rede convencional (comboios de passageiros com velocidade inferior a 200km/h e carga máxima por eixo de 200kN e comboios de mercadorias com velocidade igual ou inferior a 100km/h e carga máxima por eixo de 225kN).

São estabelecidos valores limite máximo e mínimo no que diz respeito à: (i) resistência mecânica (à fragmentação e ao desgaste), (ii) dimensão, granulometria, (iii) teor de partículas finas ($<0,5\text{mm}$), (iv) teor de finos ($<0,063\text{mm}$), (v) forma (devem apresentar forma poliédrica de tendência isométrica, designada por forma cúbica, faces rugosas e arestas vivas) e (vi) conteúdo de elementos prejudiciais (fragmentos de rochas alteradas, friáveis, grumos argilosos ou siltosos, pedaços de madeira, de plástico ou de metal, por exemplo).

Em termos da sua espessura, a camada de balastro deverá ser dimensionada para distribuir as ações de forma uniforme à fundação. Habitualmente são adotados valores entre os 250mm e os 300mm, medidos a partir da base da travessa.

2.2.4. Camada de sub-balastro

A camada de sub-balastro está localizada entre a camada de balastro e o leito da via, ou solo natural. À semelhança das outras camadas, esta também tem como função transmitir as solicitações ao solo de fundação.

As tensões induzidas pelos rodados vão reduzindo com o aumento da profundidade, pelo que na base da camada do balastro são de menor amplitude.

A camada de sub-balastro tem como função a proteção da plataforma e contribuir para a redução do nível de tensões para níveis aceitáveis ao nível da fundação (Fortunato, 2005, Indraratna et al., 2010). Além disso, esta camada funciona como barreira de separação entre o balastro e a fundação, mitigando a migração de finos, que, na presença de água, pode dar origem a lamas. Tem, também, como objetivo, mitigar o desgaste da fundação da ação mecânica do balastro. Esta camada deve ter uma inclinação transversal na ordem dos 4% a 5% para permitir o escoamento das águas para um sistema de drenagem lateral (Fortunato, 2005), impedindo a percolação da água até à fundação.

Exige-se ao sub-balastro que seja pouco deformável e tenha baixa permeabilidade, cujo coeficiente de permeabilidade seja menor ou igual a 10^{-6} m/s (IT.GEO.006, 2007), devendo esta ser intermédia à das camadas que a envolvem. São utilizados materiais naturais bem graduados, como por exemplo areias cascalhentas, que devem ter boa resistência ao desgaste e cuja granulometria deve garantir a função de filtro e de separação entre o balastro e a fundação (Fortunato, 2005). A compactação desta camada é muito importante para que tenha o funcionamento pretendido.

Em algumas estruturas ferroviárias não existe a camada de sub-balastro, sendo esta substituída por uma camada mais espessa do leito da via (terreno natural) ou geossintéticos. Em vez de se usarem materiais granulares, podem, ainda, ser aplicadas camadas com misturas betuminosas como camada de sub-balastro (Silva, 2012).

2.2.5. Fundação

Esta camada é constituída pelo leito (mais superficial) e pelo terreno natural. A plataforma deve ter capacidade de servir de apoio à superestrutura e às camadas de apoio da via. Deve manter uma posição estável no tempo, suportar tensões cíclicas sem rotura e deformações excessivas, resistir às ações ambientais e, ainda, resistir ao desgaste provocado pelo balastro e/ ou sub-balastro. Deve ter um comportamento aceitável durante a fase de construção, nomeadamente durante a compactação das camadas de sub-balastro e de balastro (Fortunato, 2005).

2.3. SOLICITAÇÕES DA VIA FÉRREA

A construção de uma nova via, ou a reabilitação de uma já existente, deve ter em conta a sua resistência face às solicitações cíclicas resultantes do tráfego, quer sejam verticais, laterais ou longitudinais, e devido às variações de temperatura.

As solicitações têm uma componente estática e uma componente dinâmica. A componente estática engloba o peso do material circulante e o peso próprio da via e a componente dinâmica depende da velocidade de circulação (Selig, 1994).

2.3.1. Forças verticais

São consideradas forças verticais, as forças perpendiculares ao plano do carril. A Figura 2.13 mostra a distribuição típica dos esforços verticais na estrutura da via férrea e a Figura 2.14 a degradação das tensões desde o carril até ao sub-balastro.

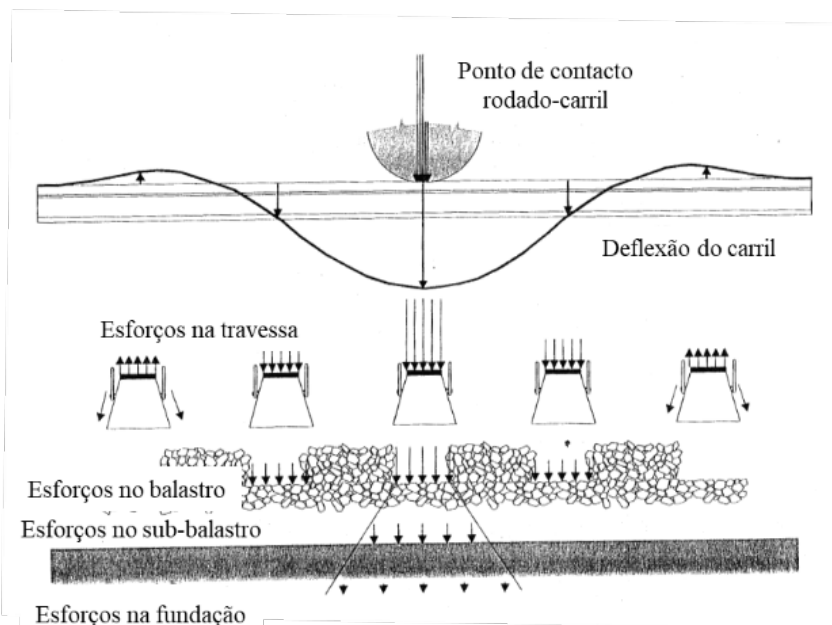


Figura 2.13 – Distribuição do carregamento na via férrea (adaptado de Selig, 1994).

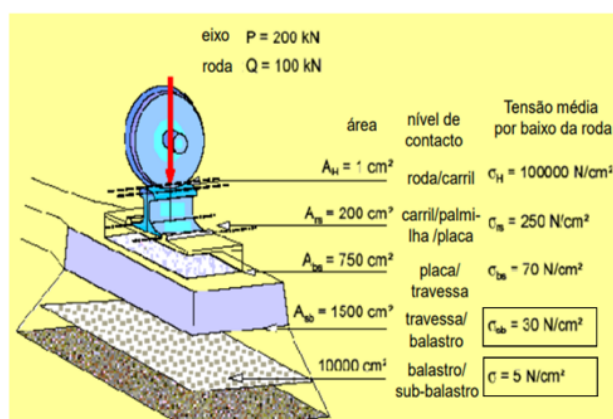


Figura 2.14 – Tensões em cada camada da via férrea balastrada (adaptado de Esveld, 2001).

Como resposta ao carregamento vertical, imposto pelo rodado ao carril, o carril tende a levantar numa zona afastada ao ponto de contacto rodado-carril. Este “levantamento” tem de ser compensado pelo peso próprio, combinado, do carril e da travessa e das forças de fricção entre as partículas de balastro (Selig, 1994). Com o avançar da roda, o carril “baixa” criando um impacto no balastro, levando à sua degradação (Kwan, 2006).

Verifica-se que os maiores esforços se situam ao nível do carril e da travessa. Observa-se que no topo da camada de balastro as tensões são na ordem dos 300kPa e que no topo do sub-balastro são na ordem dos 50kPa (Figura 2.14), verificando-se a redução das tensões.

2.3.2. Forças laterais

As forças laterais são perpendiculares ao eixo do carril, podendo ter duas causas: forças laterais induzidas pelos rodados e forças induzidas pelas variações de temperatura, que originam a encurvadura do carril.

A força lateral proveniente dos rodados resulta da fricção entre os rodados e o carril e pela força aplicada pelo verdugo do rodado. Podem resultar como resposta dos rodados aos desvios geométricos da via, movimento de lacete, próprio do material circulante, e da força centrífuga em curva (Selig, 1994).

2.3.3. Forças longitudinais

As forças longitudinais são paralelas ao eixo do carril. Estas forças podem surgir devido à aceleração e à travagem das rodas locomotoras, à expansão e à contração devido às alterações de temperatura e, ainda, à onda de avanço dos rodados durante a circulação (Selig, 1994).

A Figura 2.15 apresenta, resumidamente, as principais solicitações atuantes na via férrea.

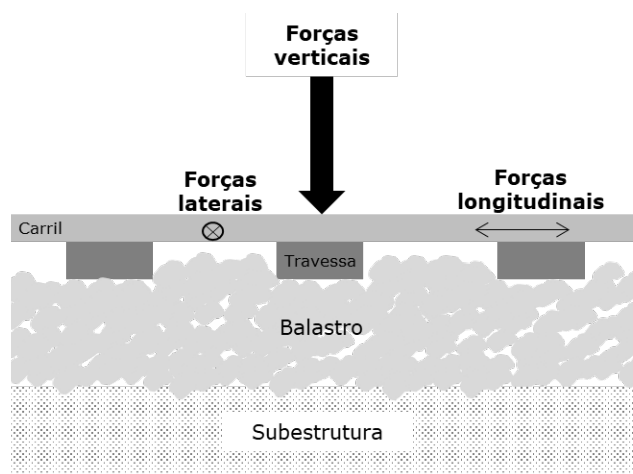


Figura 2.15 – Forças atuantes na via férrea.

2.4. MANUTENÇÃO E REABILITAÇÃO

As infraestruturas ferroviárias representam um elevado investimento pelo que, de forma a garantir a sua operacionalidade e o seu bom funcionamento durante a sua exploração, a sua manutenção é muito importante. É, por isso, importante reduzir o número de defeitos, os tempos de reparação e melhorar o seu desempenho. A segurança e o conforto dos utilizadores também são fatores a ter em consideração.

Quanto à manutenção, esta pode ser de três tipos: manutenção preventiva sistemática, manutenção preventiva condicionada e manutenção corretiva. A manutenção preventiva sistemática

traduz o conjunto de intervenções periódicas sobre um equipamento, ou sistema de equipamentos, com vista a reduzir a sua probabilidade de avaria e a conhecer o seu estado. É o tipo de manutenção mais primordial. A manutenção preventiva condicionada engloba o conjunto de intervenções de regeneração de forma planeada, tendo por base os resultados das observações e diagnósticos efetuados durante a manutenção preventiva sistemática. Este tipo de manutenção tem como objetivo garantir a funcionalidade e aptidão do equipamento, ou do sistema de equipamentos, após a deteção de anomalias. Por fim, a manutenção corretiva visa reparar equipamentos, ou sistema de equipamentos, após avaria/anomalia imprevistas, exigindo ação imediata, para garantir o bom funcionamento do serviço (Fontul, 2016).

As entidades gestoras promovem inspeções a pé, semanalmente ou mensalmente em zonas onde existiram trabalhos recentes, e em veículos de inspeção, semestralmente, existindo o acompanhamento anual dos parâmetros (Rodrigues et al., 2013).

Existem diversos condicionantes aos trabalhos de manutenção da via, nomeadamente o facto de se tratar de uma infraestrutura muito heterogénea, a necessidade de se manter a circulação constante de comboios e respeitar os regimes de interdição. É necessário, ainda, respeitar as características geométricas da via. Uma última condicionante, e não menos importante, é a economia (Fontul, 2016).

2.4.1. Irregularidades da via

Das irregularidades da via, destacam-se as irregularidades relacionadas com os parâmetros geométricos da via, as irregularidades ao nível do carril, travessas e das fixações e os defeitos relacionados com a plataforma de via e com o perfil transversal da via.

Das irregularidades relacionadas com os parâmetros geométricos da via, destacam-se (Fontul, 2016):

- Estreitamento ou o alargamento da bitola;
- Diferença entre a escala da via e a escala de projeto;
- Irregularidades no apoio dos rodados devido ao empeno (“roda no ar”);
- Alterações do nivelamento longitudinal da via, provocando um movimento de galope;
- Alterações do alinhamento longitudinal, condicionando a estabilidade lateral do material circulante.

Relacionadas com as irregularidades ao nível do carril, das travessas e das fixações, salientam-se, por exemplo, a inexistência de fixações, fissuração das travessas e desgaste e fragmentação do carril, (Silva, 2012).

Dos defeitos relacionados com a plataforma da via e a sua estabilidade vertical, destacam-se as variações da espessura da camada de balastro e a sua contaminação, como foi explicado anteriormente, as variações na espessura do sub-balastro e um sistema de drenagem não funcional.

Como causas apontadas para a instabilidade vertical da via, Kwan (2006) destaca, por exemplo:

- As forças dinâmicas e os defeitos nos rodados: Indraratna et al. (2010) verificou que um pequeno achatamento nos rodados conduziu a um pico de tensões verticais no balastro, situado abaixo da travessa, na ordem dos 415kPa, sendo os valores típicos na ordem dos 230kPa. Estes defeitos conduzem à degradação acelerada do balastro;
- Os defeitos no carril: as travessas ficam sujeitas a diferentes solicitações, originando assentamentos diferenciais na camada de balastro;
- O espaçamento das travessas: para um espaçamento não consistente das travessas, cada travessa irá transmitir ao balastro um carregamento diferente, originando assentamentos diferenciais;
- O assentamento da camada de balastro: é uma camada muito heterogénea, originando uma distribuição do carregamento pouco uniforme e, conseqüentemente, assentamentos diferenciais dentro da camada;
- A fundação: tem pouca influência, visto que num projeto ferroviário a fundação é projetada adequadamente. Tem um efeito a curto-prazo.

Ao nível do perfil transversal da via, as principais irregularidades podem ocorrer ao nível do perfil do balastro, ao nível da banquetta, da distância a obstáculos e da distância entre-eixo da via, da distância às plataformas de acesso, assim como a sua altura, por exemplo (Fontul, 2016).

As Infraestruturas de Portugal dispõem de um veículo que faz a inspeção automática dos parâmetros geométricos da via: o EM120 (até 120km/h). Este veículo efetua medições de dados relativos às sucessivas posições dos carris no espaço tridimensional, não havendo a medição em pontos fixos. Não ocorre contato físico com a via e os diversos parâmetros são registados sob forma numérica e gráfica. O EM120 regista automaticamente todos os troços em que os parâmetros geométricos excedem as tolerâncias (Quadro 2.1), determinando o seu comprimento, o valor máximo e a respetiva localização. Este veículo determina, ainda, a qualidade da via em tempo real, tendo por base as variações de aceleração. Sempre que são detetados defeitos, ocorre marcação física na via, de forma automática (Fontul, 2016).

Quadro 2.1 – Tolerâncias permitidas para cada parâmetro geométrico (IT.VIA.018, 2009).

Parâmetros	Classes de via Velocidade (km/h)	Classe I	Classe II	Classe III	Classe IV
		$V \geq 160$	$160 \geq V \geq 120$	$120 \geq V \geq 80$	$V < 80$
Nivelamento Transversal (mm)		2	2	3	4
Empeno – Base 3m (mm/m)		0,8	1	1	1,5
Nivelamento Longitudinal (mm)	Base $\leq 15m$	2	3	4	5
	$15 < \text{Base} \leq 25m$	3	4	5	6
Alinhamento – medição de flechas (mm)	Corda de 10m	2	3	4	5
	Verificação às estacas	3	3	4	5
Bitola (mm)	Excesso	2	2	3	3
	Aperto	-1	-1	-2	-2

Observa-se que as tolerâncias são mais exigentes com o aumento da velocidade de circulação e que, por exemplo, o aperto da bitola é mais condicionante que o seu excesso.

Todos os parâmetros medidos são guardados num ficheiro informático que apresenta medições de 25cm em 25cm. É, também, calculado o desvio padrão do nivelamento longitudinal e do alinhamento longitudinal de 200m em 200m, podendo concluir-se acerca da necessidade de programar o ataque mecânico pesado da via. O Quadro 2.2 apresenta o nível de qualidade da via em função dos desvios padrão medidos, onde: QN1, alerta; QN2, intervenção; QN3, ação imediata (Fontul, 2016).

Quadro 2.2 – Níveis de qualidade da via em função dos desvios padrão (Fontul, 2016).

Níveis de Qualidade Geométrica – Desvio Padrão (QN's)				
Velocidade		Desvio padrão (mm)		Níveis de qualidade
Classe	km/h	Niv. Longitudinal	Alinhamento	
VI	V≤40	$\sigma \leq 3,3$	$\sigma \leq 2,1$	QN1
		$3,3 < \sigma < 4,29$	$2,1 < \sigma < 2,73$	QN2
		$\sigma \geq 4,29$	$\sigma \geq 2,73$	QN3
V	40<V≤80	$\sigma \leq 3,0$	$\sigma \leq 1,8$	QN1
		$3,0 < \sigma < 3,9$	$1,8 < \sigma < 2,34$	QN2
		$\sigma \geq 3,9$	$\sigma \geq 2,34$	QN3
IV	80<V≤120	$\sigma \leq 2,7$	$\sigma \leq 1,5$	QN1
		$2,7 < \sigma < 3,51$	$1,5 < \sigma < 1,95$	QN2
		$\sigma \geq 3,51$	$\sigma \geq 1,95$	QN3
III	120<V≤160	$\sigma \leq 2,4$	$\sigma \leq 1,3$	QN1
		$2,4 < \sigma < 3,12$	$1,3 < \sigma < 1,69$	QN2
		$\sigma \geq 3,12$	$\sigma \geq 1,69$	QN3
II	160<V≤230	$\sigma \leq 1,9$	$\sigma \leq 1,1$	QN1
		$1,9 < \sigma < 2,47$	$1,1 < \sigma < 1,43$	QN2
		$\sigma \geq 2,47$	$\sigma \geq 1,43$	QN3
I	V>230	$\sigma \leq 1,5$	$\sigma \leq 1,0$	QN1
		$1,5 < \sigma < 1,95$	$1,0 < \sigma < 1,3$	QN2
		$\sigma \geq 1,95$	$\sigma \geq 1,3$	QN3

2.4.2. Técnicas de reabilitação

Após a inspeção da via, e tendo em vista a sua reabilitação ou renovação, há que analisar de que forma se irá proceder, de forma a melhorar toda a superestrutura da via e mitigar os defeitos que ocorreram antes da intervenção. Das várias técnicas de reabilitação, destacam-se as seguintes:

2.4.2.1. Esmerilagem

A esmerilagem tem como objetivo eliminar as ondas de desgaste ondulatório, com pedras de esmeril. São removidas décimas de milímetro de material, permitindo a eliminação de pequenas situações de fadiga pontual, resultantes do esmagamento à passagem dos rodados. É utilizada uma máquina esmeriladora de carris. A esmerilagem preventiva da via prolonga a sua vida útil e reduz os custos e a manutenção do material circulante (Fontul, 2016).

2.4.2.2. Ataque mecânico pesado

Para o ataque mecânico pesado da via recorre-se à atacadeira (Figura 2.16), à máquina

regularizadora e ao veículo estabilizador dinâmico. A atacadeira eleva o armamento da via (carril, travessas e fixações) e introduz balastro sob este, vibrando-o através de pioches que penetram na camada de balastro (Figura 2.17). De seguida, a máquina regularizadora regulariza o balastro sobre a via e uniformiza a banqueta de balastro. Na fase final, o veículo estabilizador dinâmico vibra o carril, de forma a compactar e consolidar a camada de balastro. Esta intervenção tem como objetivo colocar a cota da via na cota de projeto (Rodrigues et al., 2013).



Figura 2.16 – Atacadeira.

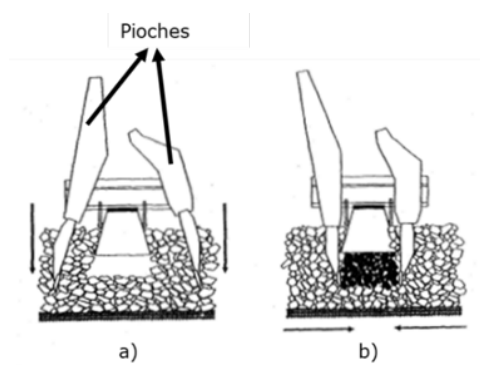


Figura 2.17 – Atacadeira: a) entrada dos pioches na camada de balastro; b) colocação de balastro sob a travessa e a sua vibração (adaptado de Selig, 1994).

2.4.2.3. Rebalastragem

A rebalastragem (Figura 2.18) é uma técnica utilizada quando a contaminação da camada de balastro é gravosa, comprometendo o seu funcionamento e desempenho desejados. É utilizada uma depuradora de balastro que efetua a sua limpeza, onde todos os detritos são eliminados (Fontul, 2016). A depuradora de balastro permite a colocação de um crivo, de forma a selecionar a dimensão das partículas a colocar na via. Aquando a rebalastragem, pode, ainda, existir a colocação de um geossintético na interface entre a subestrutura e o balastro. Na fase final da rebalastragem, recorre-se ao ataque mecânico da via (Rodrigues et al., 2013).

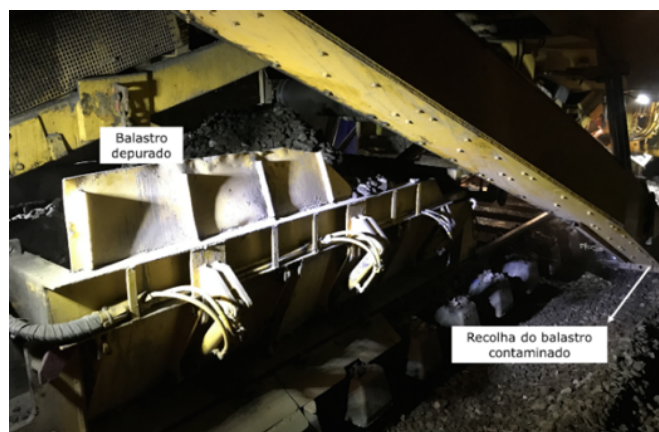


Figura 2.18 – Depuradora de balastro.

2.4.2.4. Ripagem da via

A ripagem da via é efetuada quando ocorrem alterações do alinhamento longitudinal devido a, por exemplo, um aumento exagerado da temperatura. Ripar a via significa deslocar lateralmente a via, de forma a corrigir uma curva que se tenha formado (Fontul, 2016).

2.4.2.5. Substituição da via

A substituição da via (Figura 2.19) é um caso extremo em que a reabilitação da via não é suficiente para fazer cumprir o seu estado de serviço, garantindo um funcionamento seguro e confortável, ou quando a substituição da superestrutura é a melhor opção, quer a nível económico, quer a nível de cumprimento de prazos (Fontul, 2016).



Figura 2.19 – Substituição integral da via.

2.5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo apresentou a descrição da via férrea balastrada, em termos da sua constituição, das solicitações atuantes e das principais ações de manutenção e reabilitação deste tipo de vias. Também abordou a contaminação da camada de balastro e os documentos normativos aplicados ao balastro.

A via férrea balastrada é constituída por diversos componentes e camadas que têm como função transmitir o carregamento imposto pela passagem do material circulante, desde os carris até à fundação, verificando-se que existe uma degradação de tensões.

Em Portugal, o fornecimento de balastro para vias férreas é regido pela norma NP EN 13450, que o caracteriza tendo em conta os seus requisitos geométricos e físicos. O IT.GEO.001 (2004) define dois grupos de balastro, tendo em conta a sua resistência mecânica à fragmentação e ao desgaste: o Tipo I, para sistemas ferroviários de alta velocidade e velocidade alta, e o Tipo II, para a rede convencional.

A via está sujeita quer a forças verticais, laterais e longitudinais.

Embora a estabilidade da via possa ser afetada por vários fatores, a degradação e a deformação da camada de balastro é a que mais afeta o alinhamento longitudinal e transversal da via. Observa-se, também, que as tolerâncias dos parâmetros geométricos são bastante rigorosas e são tanto mais condicionantes quanto maior for a velocidade de circulação.

As principais técnicas de reabilitação são a rebalastragem, a esmerilagem, o ataque mecânico pesado da via, a ripagem da via e, em caso extremo, a substituição integral da via.

A padronização do comportamento desta camada torna-se difícil, devido à variabilidade das características mecânicas, das características intrínsecas do balastro (espessura, forma e dimensões) e dos processos de manutenção da via.

3. GEOSSINTÉTICOS

3.1. INTRODUÇÃO

Os geossintéticos têm vindo a ser aplicados nas mais variadas obras de construção civil. As suas vantagens técnicas (grande variedade de produtos, rapidez e facilidade de aplicação), económicas (baixo custo) e ambientais (baixo impacto ambiental) são as principais razões que contribuem para a sua elevada utilização (Carneiro, 2009).

Em Portugal, os geossintéticos têm vindo a ser utilizados desde 1980 em obras hidráulicas (barragens, portos e diques) e vias de comunicação (estradas, vias férreas e aeroportos) (Borges, 1995).

Este capítulo é dedicado aos geossintéticos e apresenta os geossintéticos, em termos da sua composição, classificação e funções. Faz-se, ainda, referência à aplicação de geossintéticos em ferrovias. Neste capítulo, são, também, apresentadas as principais propriedades físicas e mecânicas e os mecanismos de funcionamento das geogrelhas.

3.2. DEFINIÇÃO E COMPOSIÇÃO

De acordo com a norma EN ISO 10318-1, um geossintético é um “termo genérico que designa um material em que pelo menos um dos seus componentes é um polímero sintético ou natural em forma de tela, tira ou estrutura tridimensional, utilizado em contacto com o solo e /ou outros materiais, em aplicações de engenharia civil e geotécnica”.

Os polímeros mais utilizados no fabrico de geossintéticos são o Polietileno (PE), Polipropileno (PP), Policloreto de Vinilo (PVC), Poliéster (PET) e a Poliamida (PA) (Pinto, 2005), sendo, ainda, utilizados aditivos, como por exemplo corantes, estabilizadores e inibidores de envelhecimento (Borges, 1995). O Quadro 3.1 relaciona os polímeros mais utilizados com alguns exemplos de geossintéticos.

Quadro 3.1 – Polímeros mais utilizados nos geossintéticos (Pinto, 2005).

Polímero	Exemplos de geossintéticos
Polietileno (PE)	Geotêxteis, geomembranas, geogrelhas, geocompósitos
Polipropileno (PP)	Geotêxteis, geomembranas, geogrelhas, geocompósitos
Policloreto de Vinilo (PVC)	Geomembranas, geocompósitos
Poliéster (PET)	Geotêxteis, geogrelhas
Poliamida (PA)	Geotêxteis, geocompósitos, geogrelhas

3.3. CLASSIFICAÇÃO DOS GEOSSINTÉTICOS

Os geossintéticos podem ser agrupados em dois grupos: os materiais permeáveis e as barreiras (Figura 3.1). Nos materiais permeáveis incluem-se os geotêxteis e os produtos relacionados, tais como as geogrelhas, as georredes e as geocélulas, por exemplo. Existem ainda os geocompósitos que combinam, pelo menos, dois tipos de geossintéticos. As barreiras saem do âmbito da presente dissertação, pelo que não serão aqui abordadas.

Nas secções seguintes descrevem-se brevemente os principais geossintéticos incluídos na família dos materiais permeáveis.

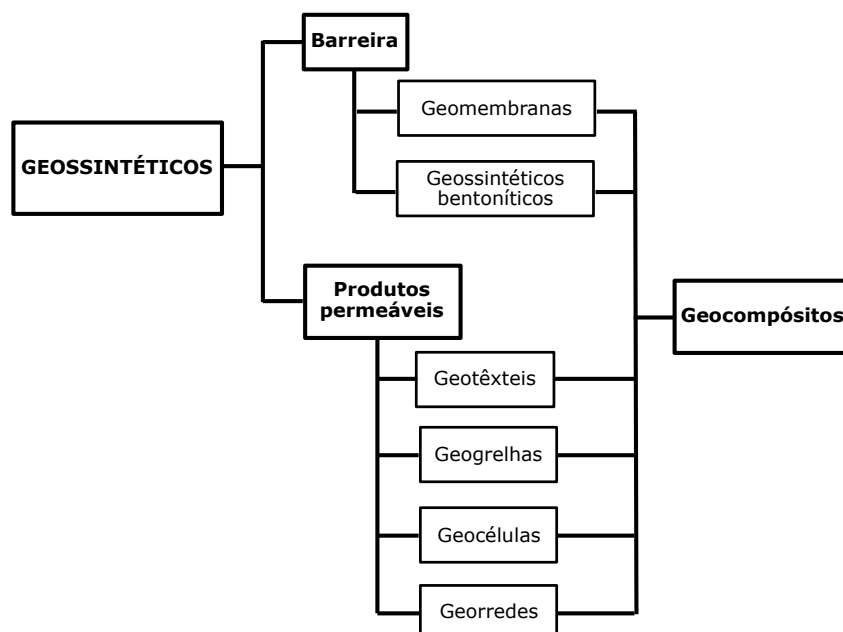


Figura 3.1 – Grupos de geossintéticos.

3.3.1. Geotêxteis

Os geotêxteis (Figura 3.2) podem ser tecidos ou não tecidos. Os geotêxteis tecidos caracterizam-se por serem constituídos, estruturalmente, por filamentos entrelaçados paralela e perpendicularmente. O processo de ligação é, normalmente, garantido pelo entrelaçado dos filamentos. Os geotêxteis não tecidos são formados por filamentos distribuídos aleatoriamente (Pinto, 2005).

A ligação entre as diversas fibras pode ser feita por via mecânica (agulhagem), térmica (aquecimento) ou química (resinas) (Pinto, 2005).

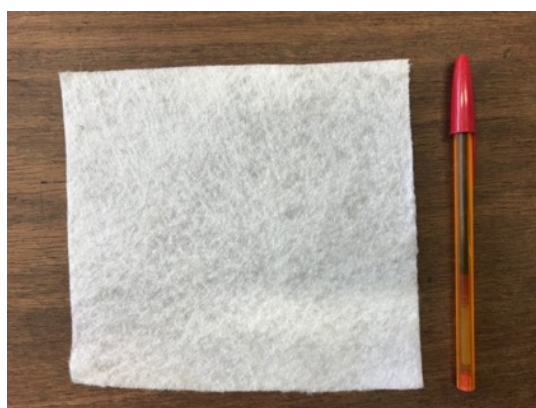


Figura 3.2 – Amostra de geotêxtil não tecido.

3.3.2. Geogrelhas

As geogrelhas são geossintéticos com a aparência de uma grelha. Podem ser uniaxiais (Figura 3.3), quando têm uma elevada resistência à tração em apenas numa das direções, ou biaxiais (Figura 3.4) quando têm resistência à tração em duas direções. Mais recentemente surgiram as geogrelhas

triaxiais (Figura 3.5), com aberturas triangulares, que conferem resistência radial (IGS – Portugal, 2017a)

Dependendo do processo de fabrico, estas podem ser extrudidas, soldadas ou tecidas, sendo que as extrudidas garantem uma melhor uniformidade da resistência. Neste caso, o fabrico consiste em perfurar uma folha de material polimérico através de moldes, onde as aberturas da malha são obtidas esticando a folha, previamente perfurada e aquecida (Tavares, 2009).

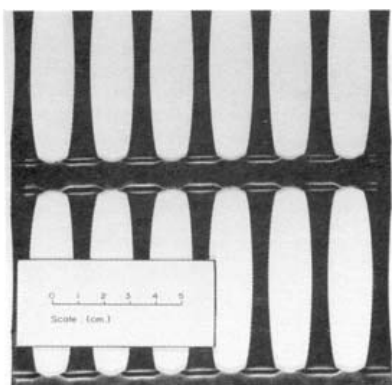


Figura 3.3 – Geogrelha uniaxial (Pinto, 2005).

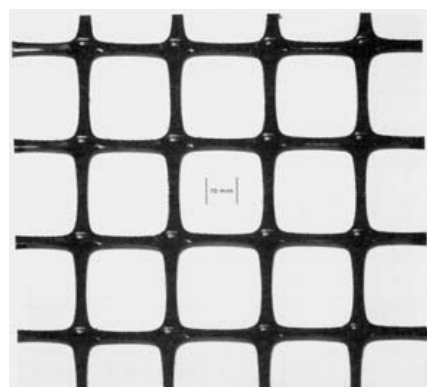


Figura 3.4 – Geogrelha biaxial (Pinto, 2005).



Figura 3.5 – Geogrelha triaxial.

A estrutura da geogrelha (Figura 3.6) é constituída por aberturas, nós, ou junções, e barras. No caso das geogrelhas triaxiais, a sua estrutura pode ser definida como a dimensão do hexágono elementar, que corresponde à distância entre duas barras paralelas do hexágono formado por duas aberturas triangulares opostas (EOTA TR041, 2012).

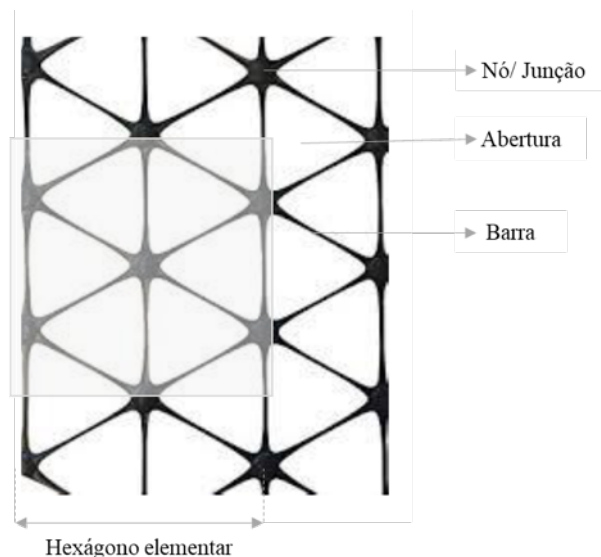


Figura 3.6 – Constituição de uma geogrelha triaxial (adaptado de Kawalec, 2017).

3.3.3. Geocélulas

Este geossintético é constituído por redes tridimensionais relativamente espessas (Figura 3.7). Esta rede é produzida a partir de tiras poliméricas que são ligadas de forma a originar células interligadas. Em obra, estas células são preenchidas com o solo, que fica confinado pelas paredes de cada célula (IGS – Portugal, 2017a; Tavares, 2009).

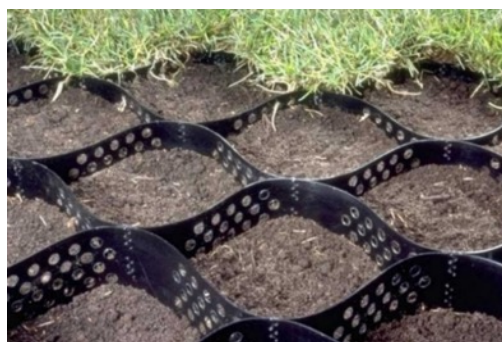


Figura 3.7 – Geocélulas (Ecosalix, 2017).

3.3.4. Georrede

As georredes (Figura 3.8) são geossintéticos obtidos por extrusão de duas séries de elementos paralelos poliméricos que se cruzam segundo um determinado ângulo (IGS – Portugal, 2017a).



Figura 3.8 – Georrede (TEGAPE, 2017).

3.4. FUNÇÕES DOS GEOSSINTÉTICOS

Os geossintéticos podem desempenhar várias funções, destacando-se a de separação, de proteção, de filtragem, de drenagem, de contenção de líquidos/ gases, de controlo da erosão e de reforço. Recentemente, foi incluída a função de estabilização.

3.4.1. Separação

Um geossintético com a função de separação tem como objetivo separar duas camadas de solo com granulometrias diferentes (Figura 3.9), impedindo que, devido às solicitações dinâmicas, as partículas das duas camadas se misturem, preservando, assim, a espessura das camadas (IGS – Portugal, 2017b).

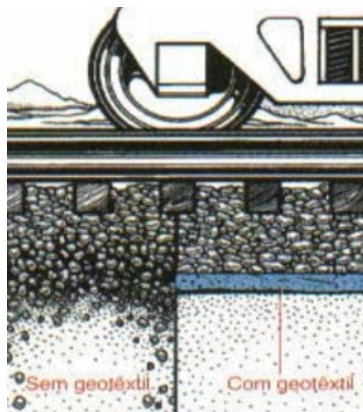


Figura 3.9 – Geossintético de separação (Gomes, 2001).

3.4.2. Proteção

Um geossintético desempenha a função de proteção (Figura 3.10) quando tem como objetivo evitar ou limitar a ocorrência de danificação de um elemento ou material. O geossintético pode ser colocado na interface entre dois materiais, para absorver ou distribuir as tensões, ou as deformações, que fossem transmitidas ao material a proteger (Carneiro, 2009).

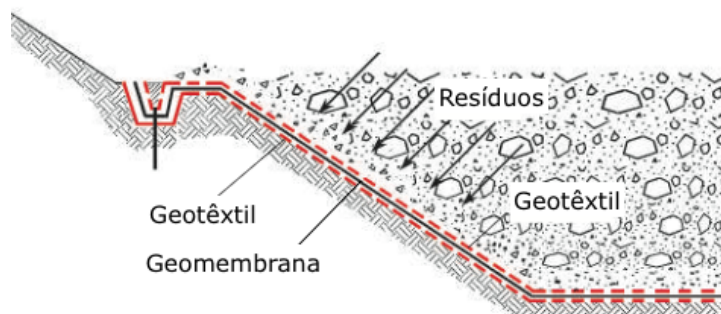


Figura 3.10 – Geossintético de proteção (adaptado de Maccaferri, 2017).

3.4.3. Filtragem

Quando os geossintéticos atuam como filtros (Figura 3.11) permitem a percolação da água através do solo e a retenção de finos que possam ser transportados por esta. Os geotêxteis desempenham esta função.

No âmbito das ferrovias, pode ser colocado na interface sub-balastro – balastro, de forma a impedir a migração de finos do sub-balastro para o balastro, evitando-se, assim, a sua contaminação com finos (IGS – Portugal, 2017b).



Figura 3.11 – Geossintético de filtragem (Gomes, 2001).

3.4.4. Drenagem

Nesta situação, o geossintético funciona como um dreno (Figura 3.12), coletando e escoando a água existente no solo. Podem, também, ser utilizados para dissipar as pressões de água na base de aterros ou até como contributo no processo de consolidação de solos moles (IGS – Portugal, 2017b).



Figura 3.12 – Geossintético de drenagem (Gomes, 2001).

3.4.5. Contenção de líquidos/ gases

Neste caso, o geossintético funciona como barreira impermeável a líquidos e gases (Figura 3.13), impedindo o seu escoamento. Exemplos de geossintéticos com esta função são as barreiras geossintéticas, também designadas por geomembranas e geocompósitos bentoníticos (IGS – Portugal, 2017b).

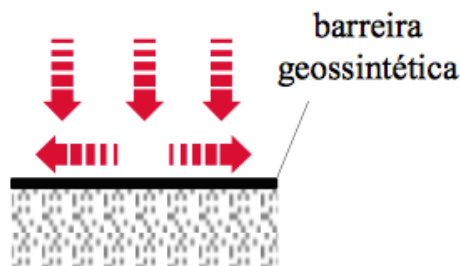


Figura 3.13 – Geossintético de contenção de gases e líquidos (IGS – Portugal, 2017b).

3.4.6. Controlo da erosão

Os geossintéticos são utilizados para minimizar e controlar a erosão do solo, quer seja devida às águas pluviais, quer pelo escoamento de águas superficiais. As geocélulas podem desempenhar esta função (Figura 3.14) (IGS – Portugal, 2017b).

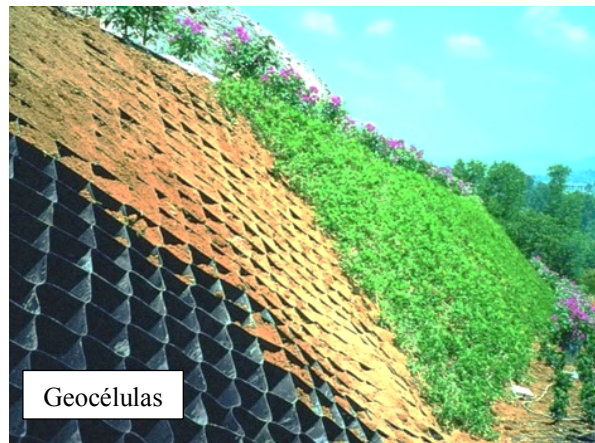


Figura 3.14 – Geossintético de controlo da erosão (Ecosalix, 2017).

3.4.7. Reforço

Um geossintético desempenha a função de reforço (Figura 3.15 e Figura 3.16) quando tem como objetivo melhorar as propriedades mecânicas de um solo, ou outro material de construção. Para esta função, o geossintético tem de ter propriedades adequadas, quer no momento da instalação quer no decorrer da sua vida útil (Carneiro, 2009).

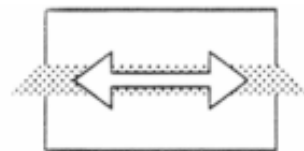


Figura 3.15 – Geossintético de reforço (EN ISO 10318-2).

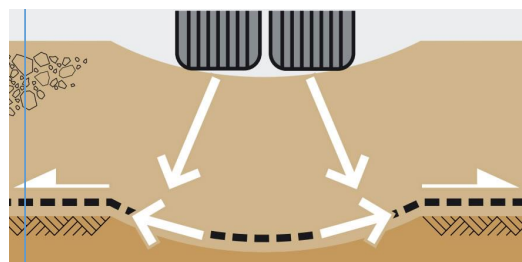


Figura 3.16 – Função de reforço (Kawalec, 2017).

3.4.8. Estabilização

Os geossintéticos podem ter, ainda, a função de estabilização (Figura 3.17). Para o efeito, são aplicados em materiais granulares, conferindo-lhes confinamento (Kawalec, 2017).

A função de estabilização surgiu recentemente como uma função adicional proporcionada pelos geossintéticos, onde as geogrelhas triaxiais estão incluídas. Embora ainda não tenham sido oficialmente

publicadas as adendas à EN ISO 10318-1 e o respetivo pictograma, o Comité Técnico 221 define estabilização como uma melhoria do comportamento mecânico de materiais granulares soltos através da introdução de geogrelhas, tal que a sua deformação, aquando a aplicação de um carregamento, é minimizada devido à redução dos movimentos do material granular solto.

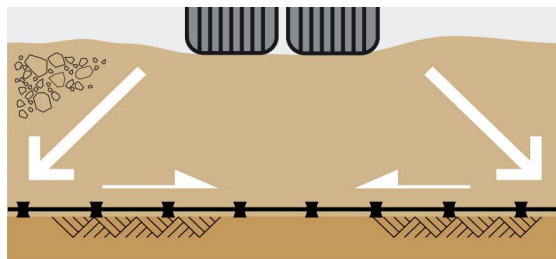


Figura 3.17 – Função de estabilização (Kawalec, 2017).

O Quadro 3.2 apresenta, de forma resumida, a comparação entre os efeitos providenciados pelos geossintéticos, nomeadamente pelas geogrelhas, nas funções de estabilização e de reforço.

Quadro 3.2 – Estabilização e reforço (adaptado de Kawalec, 2017).

Estabilização	Reforço
<ul style="list-style-type: none"> – Restrição lateral e redução do deslocamento lateral das partículas; – Efeito de confinamento do agregado; – Importância da relação A/D (imbricamento); – Aumento da rigidez no plano do geossintético. 	<ul style="list-style-type: none"> – Fricção partículas/ geossintético; – Efeito de membrana tensionada; – Importância da resistência à tração do geossintético e da extensão na rotura; – Aumento da capacidade de carregamento.

Legenda: A – abertura da malha da geogrelha; D – Dimensão do agregado

De uma forma resumida, o Quadro 3.3 apresenta as principais funções de cada geossintético.

Quadro 3.3 – Quadro resumo da função principal dos geossintéticos (adaptado de Koerner, 1998).

Geossintético	Principais funções						
	Separação	Reforço	Filtragem	Drenagem	Impermeabilização	Proteção	Estabilização
Geotêxtil	✓	✓	✓	✓		✓	
Geogrelha		✓					✓
Barreiras (geomembrana e geossintético bentonítico)					✓		
Geocompósito	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Geocélula		✓				✓	✓
Georrede				✓		✓	

3.5. APLICAÇÃO DE GEOSSINTÉTICOS EM FERROVIAS

Num cenário ferroviário, os geossintéticos podem desempenhar funções de separação entre materiais diferentes, de filtragem, de drenagem e de reforço e/ou estabilização, tal como ilustrado na Figura 3.18.

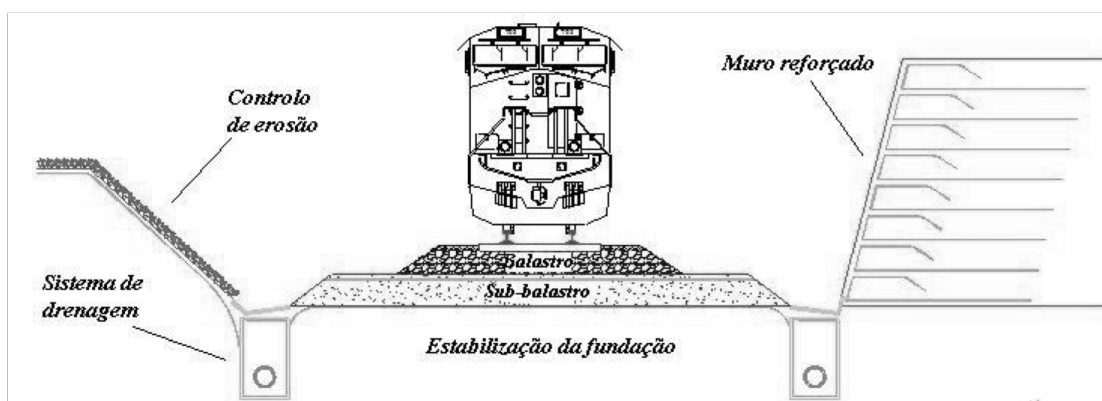


Figura 3.18 – Geossintéticos num projeto ferroviário (IGS – Portugal, 2017c).

Na interface de cada camada constituinte da via férrea, pode aplicar-se um geotêxtil com a função de separação, de forma a evitar que finos da fundação cheguem às camadas superiores, mantendo a integridade e a espessura das camadas e prevenindo a contaminação da camada de balastro. Nesta aplicação, o geossintético deve ser resistente ao rasgamento e ao punçoamento. As suas aberturas devem ter uma dimensão compatível com as dimensões das partículas que se desejam reter (IGS – Portugal, 2017c).

O geotêxtil pode ainda funcionar como filtro, retendo os finos que possam ser transportados pela água. O geotêxtil deve ser, nesta aplicação, permeável e resistente à colmatagem (IGS – Portugal, 2017c).

A drenagem da via é importante de forma a mitigar a sua deterioração pelas águas pluviais ou pelas águas provenientes do solo. Podem ser colocados geocompósitos de forma a evitar a acumulação de água e drenar a via transversalmente (Figura 3.19). Devem ter uma capacidade de escoamento adequada e resistência à danificação mecânica (IGS – Portugal, 2017c).

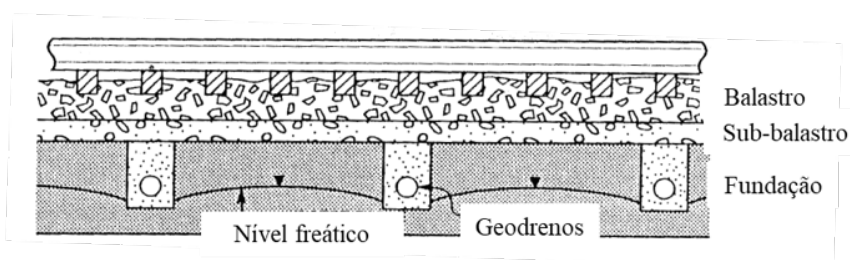


Figura 3.19 – Drenagem transversal da via férrea (adaptado de Selig, 1994).

As funções de reforço e de estabilização estão, também, presentes. A colocação de geocélulas na camada de sub-balastro, a existência de geogrelhas na camada de balastro, ou sub-balastro, ou até mesmo de geocompósitos (geogrelha com geotêxtil) são alguns exemplos.

De acordo com Tavares (2009), estes geossintéticos quando utilizados na camada de balastro ou sub-balastro melhoram a qualidade da via, devido a:

- Distribuição mais uniforme dos esforços pelas diversas camadas;

- Aumento da capacidade de carregamento;
- Aumento do confinamento da via, impedindo a dispersão das partículas de balastro;
- Mitiga as deformações da via, ao mitigar os assentamentos da camada de balastro;
- Redução da degradação do balastro;
- Aumento da rigidez da via.

No âmbito da presente dissertação, destaca-se a utilização de geogrelhas na camada de balastro, com a função reforço e/ou de estabilização. Para uma situação de reforço, as propriedades mais importantes do geossintético são, de acordo com Tavares (2009):

- A resistência à tração e o módulo de deformabilidade (elevado), de forma a garantir a função de reforço;
- A fluência e a relaxação (baixas) de maneira a que o reforço se mantenha eficaz durante a vida útil da obra;
- A durabilidade e a resistência à abrasão compatíveis com a vida útil da obra.

Como se pode observar pela Figura 3.18, podem existir, ainda, geogrelhas uniaxiais para a estabilização de taludes e geocélulas de forma a controlar a sua erosão (IGS – Portugal, 2017c).

3.6. GEOGRELHAS

3.6.1. Propriedades

As propriedades das geogrelhas podem ser divididas em propriedades físicas, mecânicas, hidráulicas e de durabilidade. Relativamente às propriedades físicas, estas incluem a densidade relativa dos polímeros, a massa por unidade de área, a espessura e a distribuição e dimensão das aberturas. Nas mecânicas, incluem-se as propriedades de tração, a resistência ao rasgamento, a resistência ao punçoamento e as propriedades de atrito nas interfaces. A fluência também pode ser considerada uma propriedade mecânica, embora esteja muitas vezes associada, também, a propriedades de durabilidade. A abrasão e a resistência a agentes físicos, químicos e biológicos inserem-se nas propriedades relacionadas com a durabilidade (Carneiro, 2009).

As principais propriedades das geogrelhas, com maior destaque para a resistência à tração, apresentam-se de seguida. As propriedades hidráulicas não são apresentadas, por não serem relevantes para a função das geogrelhas, e as de durabilidade saem do âmbito do trabalho.

3.6.1.1. Propriedades físicas

Massa por unidade de área

A massa por unidade de área é expressa em g/m^2 . Usualmente é também designada por gramagem do geossintético. Em Portugal, a norma de ensaio usada para determinar esta propriedade é a norma NP EN ISO 9864.

De um modo geral, esta propriedade está muitas vezes relacionada com o custo do geossintético e com as propriedades mecânicas de tração ou de punção, para o mesmo polímero e processo de fabrico. Durante o fabrico, esta propriedade pode também ser utilizada como indicador de qualidade, dando indicações de uniformidade do produto (Carneiro, 2009).

Espessura

A espessura é definida como a distância, em milímetros, entre a superfície superior e inferior do geossintético, medida para uma determinada pressão. É utilizada a norma NP EN ISO 9863-1 para determinar a espessura do geossintético.

3.6.1.2. Propriedades mecânicas

Propriedades de tração

As propriedades de tração são determinadas por ensaios de tração-extensão. Em Portugal, utiliza-se a norma NP EN ISO 10319 (método com tiras largas), a norma NP EN 29073-3 e a norma NP EN ISO 13934-1 (método com tiras estreitas). Estas normas são aplicadas a geotêxteis e produtos relacionados, onde se incluem as geogrelhas.

A norma EN ISO 10319 é aplicável a geogrelhas ortogonais, uniaxiais ou biaxiais, onde as propriedades de tração são determinadas na direção de fabrico (0°) e na direção perpendicular ao fabrico (90°) (Figura 3.20).

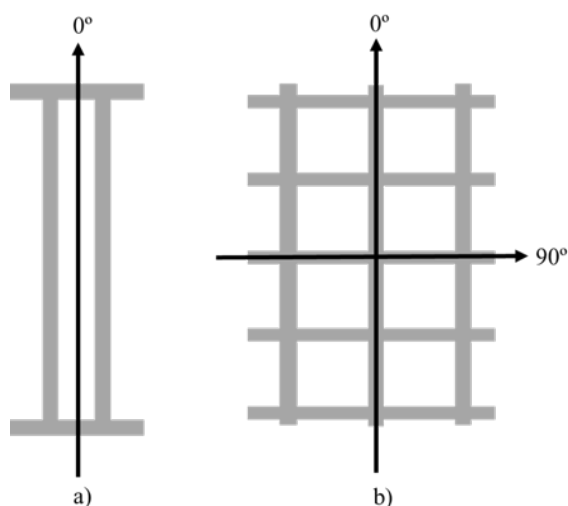


Figura 3.20 – Direções de ensaio para uma a) geogrelha uniaxial e uma b) geogrelha biaxial.

No caso das geogrelhas triaxiais, é utilizada a mesma norma de ensaio, mas com adaptações na sua metodologia. O ensaio das geogrelhas triaxiais é feito em 4 direções: duas direções coincidentes com o meio da barra (0° e 60°) e duas direções coincidentes com a barra (30° e 90°) (Figura 3.21). O documento técnico EOTA TR041 (2012) define o procedimento de ensaio para as geogrelhas triaxiais.

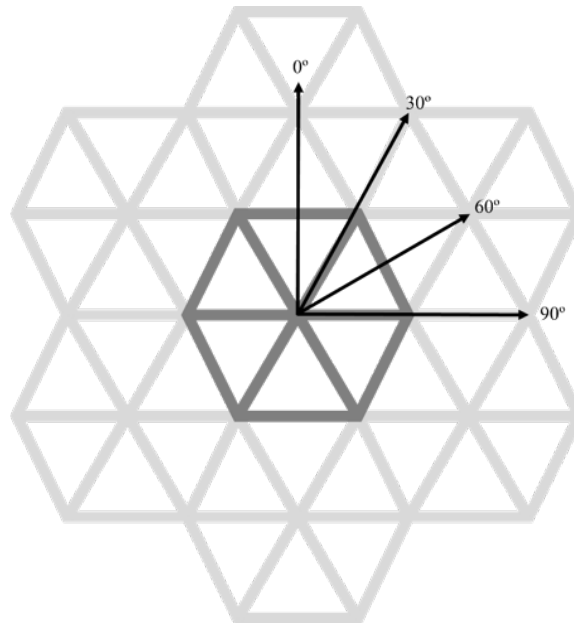


Figura 3.21 – Direções de ensaio para uma geogrelha triaxial.

– Resistência à tração

Do ensaio de tração obtém-se uma curva que relaciona a força por unidade de largura (kN/m) com a extensão (%). A partir deste ensaio obtém-se vários parâmetros, nomeadamente a resistência à tração (por unidade de largura), a extensão na força máxima e/ ou na rotura, a rigidez secante e a robustez.

De um modo geral, a resistência à tração de um geossintético, em kN/m, pode ser calculada pela Equação 3.1.

$$T = F_{m\acute{a}x} \times C \quad \text{Equação 3.1}$$

Onde:

$F_{m\acute{a}x}$ – Força máxima registada durante o ensaio de tração-extensão (kN);

C – Parâmetro obtido ou pela Equação 3.2, para geotêxteis não-tecidos, tecidos de malha apertada ou materiais similares, ou pela Equação 3.3, para geotêxteis tecidos de malha larga, georredes, geogrelhas ou materiais semelhantes com uma estrutura aberta.

$$C = \frac{1}{B} \quad \text{Equação 3.2}$$

Onde:

B – Largura nominal do provete (m);

$$C = \frac{N_M}{N_S} \quad \text{Equação 3.3}$$

Onde:

N_M – Número mínimo de elementos (barras, filamentos ou fitas), existentes em 1 metro de largura do material;

N_S – Número de elementos (barras, filamentos ou fitas) existentes no provete sujeito ao ensaio.

– Extensão na força máxima

A extensão (%) pode ser calculada pela Equação 3.4.

$$\varepsilon = \frac{L_f - L_i}{L_i} \quad \text{Equação 3.4}$$

Onde:

ε – Extensão (%);

L_f – Distância final entre dois pontos de referência;

L_i – Distância inicial entre dois pontos de referência;

Para o cálculo da extensão na força máxima, o parâmetro L_f toma o valor da distância entre os dois pontos de referência no momento em que se atinge a força máxima ($L_{máx}$).

– Rigidez secante

A rigidez secante (kN/m), J_{sec} , (Figura 3.22) pode ser calculada a partir da Equação 3.5.

$$J_{sec} = \frac{F_\varepsilon \times C}{\varepsilon} \times 100 \quad \text{Equação 3.5}$$

Onde:

F_ε – Força determinada para a extensão ε (kN);

ε – Extensão (%);

C – Parâmetro calculado pelas Equações 3.2 ou 3.3.

No caso das geogrelhas triaxiais, a rigidez secante é calculada pela média aritmética da rigidez obtida nas quatro direções de ensaio, sendo denominada por rigidez radial.

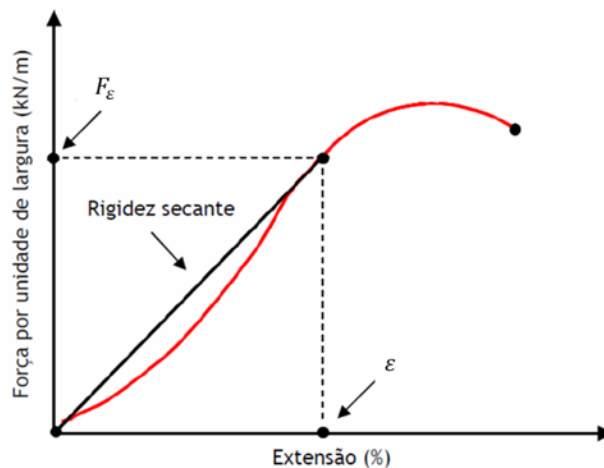


Figura 3.22 – Curva tensão-extensão típica, com a rigidez secante (Carneiro, 2009).

– Robustez

A robustez (kN/m ou KJ/m^2) é a energia máxima que um material pode absorver antes de ocorrer a sua rotura. Pode ser calculada pela área abaixo da curva força-extensão do material (Carneiro, 2009).

– Eficácia das junções da geogrelha

A eficácia das junções é muito importante para que ocorra a distribuição e a transmissão dos esforços de uma barra para as barras adjacentes a um dado nó, em direções diferentes.

O documento técnico EOTA TR041 (2012) prevê a determinação da resistência à tração de uma barra isolada (Figura 3.23) e a determinação da resistência à tração de uma junção, também isolada (Figura 3.24). Como foi referido anteriormente, a norma NP EN ISO 10319 é aplicada a geogrelhas ortogonais, logo, para avaliar a eficiência das junções de uma geogrelha triaxial, são ensaiados provetes de barras e junções com as direções de $30^\circ/210^\circ$, $90^\circ/270^\circ$ e $150^\circ/315^\circ$, como indica a Figura 3.25.

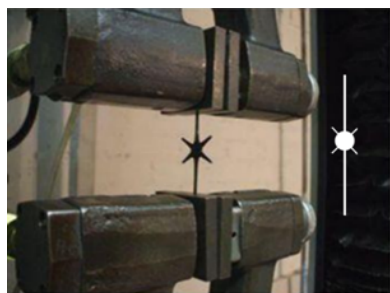


Figura 3.23 – Ensaio com uma barra isolada (EOTA TR041, 2012).

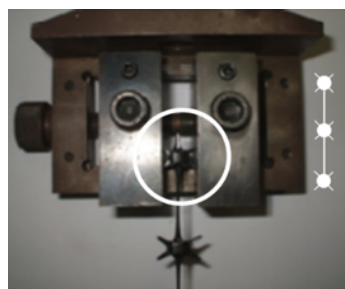


Figura 3.24 – Ensaio com uma junção isolada (EOTA TR041, 2012).

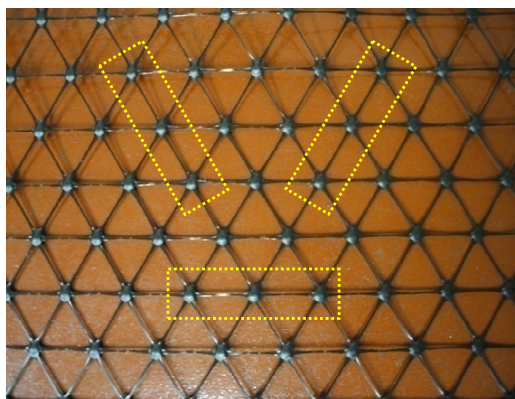


Figura 3.25 – Direções de ensaio para a determinação da eficiência das junções (EOTA TR041, 2012).

No fim de cada ensaio, determina-se o valor máximo da força que levou à rotura dos provetes. A eficiência das junções é um valor percentual, obtido pelo quociente entre a resistência à tração média da barra e a resistência à tração média da junção (multiplicado por 100) (EOTA TR041, 2012).

Fluência

Fluência é a deformação de um geossintético ao longo do tempo submetido a uma carga, ou tensão, constante. É uma propriedade a ter em conta para tempos de serviço longos, pois pode ocorrer a rotura brusca devido à fluência, após um longo período de tempo sob carga constante (Carneiro, 2009). Para avaliar a fluência e a rotura por fluência utiliza-se a metodologia descrita na norma EN ISO 13431.

Atrito nas interfaces

Esta propriedade é das mais importantes quando o geossintético desempenha a função de reforço e/ou estabilização. A transferência de tensões e esforços dos agregados ou solo para o geossintético é feita através desta interação. Esta interação é analisada através de ensaios de corte direto e/ou ensaios de arrancamento. Os ensaios de corte direto seguem a norma NP EN ISO 12957-1 e os ensaios de arrancamento seguem a norma NP EN 13738.

3.6.2. Mecanismos de funcionamento da geogrelha

Os principais mecanismos de funcionamento da geogrelha na camada granular onde estão inseridas são o imbricamento (Figura 3.26) e o confinamento (Figura 3.27).

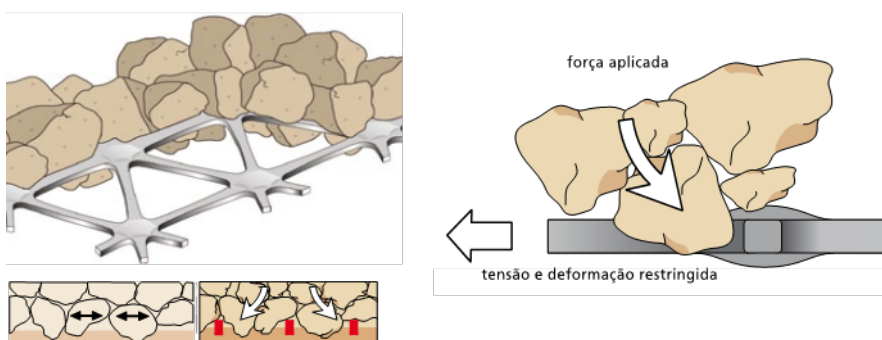


Figura 3.26 – Mecanismo de imbricamento (Tensar – Railway, 2012).

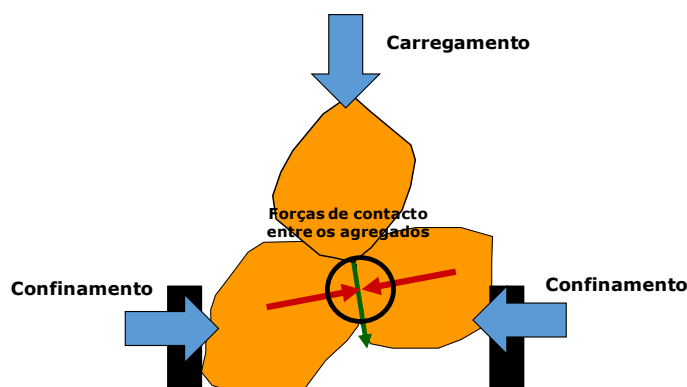


Figura 3.27 – Mecanismo de confinamento (adaptado de Kawalec, 2017).

Quando os agregados de uma camada são compactados, as partículas granulares penetram parcialmente através das aberturas da geogrelha, originando o efeito de imbricamento, pelo que a relação

entre a dimensão da abertura da malha da geogrelha e a dimensão do agregado é muito importante. O imbricamento faz com que seja a geogrelha a resistir a esforços horizontais de tração, impostos pelas solicitações (Kwan, 2006).

Decorrente do imbricamento, existe o mecanismo de confinamento. No mecanismo de confinamento, o movimento das partículas de balastro, quando solicitadas, é minimizado devido à presença da geogrelha, que funciona como uma restrição ao movimento. Este efeito não é um efeito ativo, mas reativo, visto que só ocorre com a aplicação de um carregamento e com a existência do mecanismo de imbricamento. Junto à geogrelha o movimento das partículas é diminuto devido ao confinamento. Este confinamento reduz com o aumento da distância à geogrelha, até que apenas o atrito entre partículas contribui para resistir ao movimento (Kawalec, 2017). Pela Figura 3.28 verifica-se que mesmo para as partículas mais afastadas da geogrelha, o seu movimento ficará mais restringido devido à restrição do movimento das partículas ao nível da geogrelha.

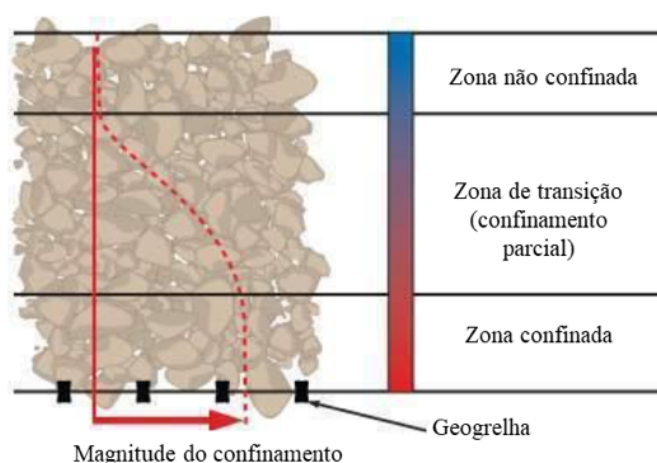


Figura 3.28 – Magnitude do efeito de confinamento (adaptado de Kawalec, 2017).

3.7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo foi dedicado aos geossintéticos, em termos de composição, classificação e funções. Fez-se, também, referência à aplicação de geossintéticos em vias férreas e apresentaram-se as principais propriedades e os mecanismos de funcionamento das geogrelhas.

Estes materiais podem ser aplicados na separação das diversas camadas da estrutura ferroviária, no seu reforço e/ou estabilização e na drenagem da via, por exemplo.

De salientar que a determinação das propriedades de geogrelhas triaxiais requer a adaptação da metodologia de ensaio da norma EN ISO 10319, nomeadamente as direções de ensaio dos provetes.

Os mecanismos de funcionamento das geogrelhas, com relevância para este trabalho, são os de imbricamento e de confinamento, onde a interação entre o agregado e a geogrelha é muito importante.

4. ESTADO DO CONHECIMENTO SOBRE A APLICAÇÃO DE GEOGRELHAS NA CAMADA DE BALASTRO

4.1. INTRODUÇÃO

As geogrelhas têm sido usadas para reforço de solos coesivos ou granulares há várias décadas, quer seja para conferir resistência à tração, quer seja para melhorar a sua capacidade de carregamento.

A via férrea balastrada é constituída por agregados de dimensões relativamente grandes, que têm como função garantir uma boa drenagem da via e uma boa distribuição das cargas transmitidas pela passagem do material circulante.

O movimento das partículas de balastro e a sua fragmentação conduzem a problemas de assentamentos da via não compatíveis com uma circulação segura, cómoda e económica, propiciando ações de manutenção mais rotineiras. O desempenho da camada de balastro está associado com a sua possibilidade de se movimentar, quer verticalmente, quer horizontalmente.

De forma a melhorar o comportamento da camada de balastro, podem ser utilizadas geogrelhas. Este trabalho foca-se na aplicação de geogrelhas na camada de balastro. A introdução de geogrelhas na superestrutura da via férrea pode ser feita na interface entre o balastro e a subestrutura, quer acima desta interface. A sua localização é condicionada pela profundidade da entrada dos pioches durante o ataque da via (aproximadamente 15cm), visto que se a geogrelha se situar muito próximo destes, pode ser danificada e comprometer o desempenho da sua função (Indraratna et al., 2013a).

O comportamento da camada de balastro tem vindo a ser estudado por diversos autores. Neste capítulo faz-se uma síntese dos principais trabalhos realizados recentemente.

Apresentam-se as metodologias utilizadas para avaliar o comportamento do balastro com a colocação de geogrelhas e os tópicos estudados, bem como a análise dos resultados relatados pelos diferentes autores em termos de assentamento da camada de balastro, de deslocamento horizontal, de esforços na interface, de deformabilidade vertical da via, de deflexão do carril e fragmentação do balastro. É, ainda, analisada a interação balastro-geogrelha, tendo em conta a influência da localização da geogrelha na camada de balastro, a influência da aplicação de um geotêxtil adicional e a relação entre a dimensão da abertura da malha da geogrelha e a dimensão do balastro.

4.2. METODOLOGIAS ADOTADAS E TÓPICOS ESTUDADOS

A influência da aplicação de geogrelhas no comportamento da camada de balastro tem sido estudada por diversos autores em laboratório, em campo e através de modelos numéricos.

A Figura 4.1 apresenta as principais metodologias utilizadas na literatura para estudar o comportamento da camada de balastro reforçada/ estabilizada com geogrelhas e a interação balastro/ geogrelha.

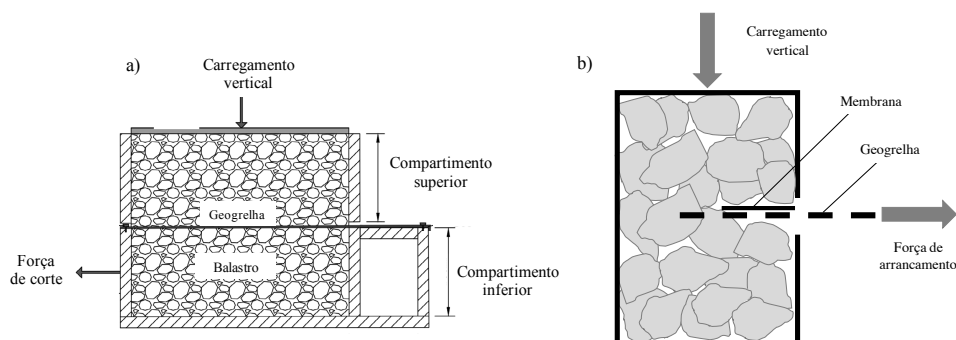


Figura 4.3 – a) ensaio de corte direto e b) ensaio de arrancamento.

O Quadro 4.1 relaciona os tópicos estudados com os tipos de ensaio utilizados e os respectivos autores.

Quadro 4.1 – Tópicos estudados e respectivos ensaios.




Tópicos estudados	Tipo de ensaios	Referências
Assentamento da camada de balastro	- Laboratorial; - <i>In situ</i>	Liu et al. (2016); Cook et al. (2015); Cook et al. (2013); Indraratna et al. (2013a); Indraratna et al. (2013b); Indraratna et al. (2010); McDowell e Stickley (2006); Indraratna et al. (2006)
Deslocamento horizontal do balastro	- Laboratorial; - <i>In situ</i>	Indraratna et al. (2013a); Indraratna et al. (2013b); Indraratna et al. (2010)
Fragmentação do balastro	- Laboratorial	Indraratna et al. (2013a); Indraratna et al. (2013b); Indraratna et al. (2006); McDowell e Stickley (2006)
Rigidez da camada de balastro	- Laboratorial	Liu et al. (2016); McDowell e Stickley (2006)
Módulo de deformabilidade	- <i>In situ</i>	Hornicek et al. (2017); Hornicek e Brestovsky (2014)
Esforços na interface balastro/ sub-balastro	- Laboratorial; - <i>In situ</i>	Petriaev et al. (2017); Indraratna et al. (2013a); Indraratna et al. (2013b); Indraratna et al. (2010)
Rotações/ acelerações do balastro	- Laboratorial	Liu et al. (2016)
Resistência lateral da via	- Laboratorial; - <i>In situ</i>	Esmaili et al. (2017)
Deflexão do carril	- <i>In situ</i>	Petriaev (2017); Hornicek et al. (2017)
Parâmetros geométricos da via	- <i>In situ</i>	Hornicek et al. (2017)
Abertura da malha da geogrelha /Dimensão do balastro (A/D)	- Laboratorial	Kwan (2006) ¹ ; Indraratna et al. (2013a) ¹ ; Sweta e Hussaini (2018) ⁽¹⁾ ; Han et al. (2017) ²

⁽¹⁾ $D = D_{50}$; ⁽²⁾ $D_{\min} \leq D \leq D_{\max}$

Embora tenham sido estudados vários tópicos, o presente trabalho foca-se no assentamento da camada de balastro, no deslocamento horizontal, nos esforços na interface balastro/sub-balastro, na deformabilidade vertical da via, na deflexão do carril, na fragmentação do balastro e na relação entre a dimensão da abertura da geogrelha e a dimensão do balastro. O ANEXO 1 apresenta algumas considerações gerais sobre os tópicos analisados neste capítulo.

De forma a avaliar o comportamento da camada de balastro com a aplicação de geogrelhas, o Quadro 4.2 apresenta as geogrelhas estudadas pelos autores, relacionando a forma da abertura com as suas dimensões e os diferentes autores.

Quadro 4.2 – Forma e dimensões das aberturas da malha das geogrelhas estudadas e as respectivas referências.

Geogrelhas estudadas		Referências
Forma da abertura	Abertura (mm)	
	36x36x36	Indraratna et al. (2013a); Indraratna et al. (2012)
	46x46x46	Han et al. (2017); Sweta e Hussaini (2018)
	55x55x55 ⁽¹⁾	Hornicek et al. (2017); Liu et al. (2016); Cook et al. (2015); Cook et al. (2013)
	65x65x65	Sweta e Hussaini (2018)
	69x69x69	Sweta e Hussaini (2018)
	32x32	Kwan (2006)
	33x33	Indraratna et al. (2012)
	38x38	Indraratna et al. (2013a); Indraratna et al. (2012)
	39x39	Petriaev et al. (2017); Petriaev (2017); McDowell e Stickley (2006); Sweta e Hussaini (2018)
	40x40	Esmaeili et al. (2017); Indraratna et al. (2013b);
	50x50	Petriaev et al. (2017); Petriaev (2017);
	65x65	Cook et al. (2013); Indraratna et al. (2013a); Indraratna et al. (2012); McDowell e Stickley (2006); Kwan (2006)
	32x31	Han et al. (2017)
	34x36	Sweta e Hussaini (2018)
	36x24	Indraratna et al. (2012)
	35x45	Petriaev et al. (2017); Petriaev (2017);
	40x27	Indraratna et al. (2006)
	44x27	Indraratna et al. (2010)
	44x42	Indraratna et al. (2013a); Indraratna et al. (2012)
	70x110	Indraratna et al. (2012)

⁽¹⁾ corresponde a um hexágono elementar de 120mm

Os autores utilizaram geogrelhas biaxiais (aberturas quadrangulares e retangulares) e triaxiais (aberturas triangulares). As dimensões das aberturas da malha da geogrelha variaram entre 32x32mm e 70x110mm. Em contexto de aplicação prática de geogrelhas em ferrovias, as aberturas mais comuns são as biaxiais de 65x65mm (resistência à tração de 30kN/m) e as triaxiais com hexágonos elementares de 120mm, que correspondem a barras com 55mm de comprimento (rigidez radial de 540kN/m).

O balastro utilizado teve maioritariamente origem ígnea e a sua dimensão média variou entre 35mm (Indraratna et al., 2013a; Indraratna et al., 2013b; Indraratna et al., 2012; Indraratna et al., 2006) e 45mm (Esmaeili et al., 2017).

O comportamento da camada de balastro varia em função das características das partículas que a constituem. A análise bibliográfica realizada mostra que tem sido estudada a aplicação de geogrelhas na camada de balastro atendendo à utilização de balastro novo, de balastro reciclado, bem como às condições prevalentes (contaminação e saturação da camada de balastro). O Quadro 4.3 apresenta as condições do balastro estudadas e as respectivas referências.

Quadro 4.3 – Condições do balastro e da camada de balastro estudadas com a colocação de geogrelhas e respectivas referências.

Fase	Balastro	Referências
Construção	Novo	Hornicek et al. (2017); Liu et al. (2016); Cook et al. (2015); Cook et al. (2013); Indraratna et al. (2013a); Indraratna et al. (2013b); Esmacili et al. (2017); Indraratna et al. (2010)
	Reciclado	Petriaev et al. (2017); Petriaev (2017); Indraratna et al. (2010); Indraratna et al. (2006); Esmacili et al. (2017)
Exploração	Contaminado	Indraratna et al. (2013b)
	Saturado	Indraratna et al. (2006); McDowell e Stickley (2006)

Nas secções seguintes apresentam-se os resultados obtidos pelos autores, em termos de melhorias face à situação não reforçada/ estabilizada, com a colocação de geogrelhas na camada de balastro. Analisa-se ainda a interação balastro/ geogrelha.

4.3. ANÁLISE DOS RESULTADOS RELATADOS NA BIBLIOGRAFIA

4.3.1. Generalidades

Para facilidade de leitura, refira-se que o termo “interface” diz respeito à fronteira entre a camada de balastro e a camada subjacente (fronteira entre a superestrutura e a subestrutura da via). A localização da geogrelha na camada de balastro foi feita em relação a esta interface. A Figura 4.4 apresenta esquematicamente a localização da interface referida e o respetivo referencial adotado para a localização da geogrelha na camada de balastro.

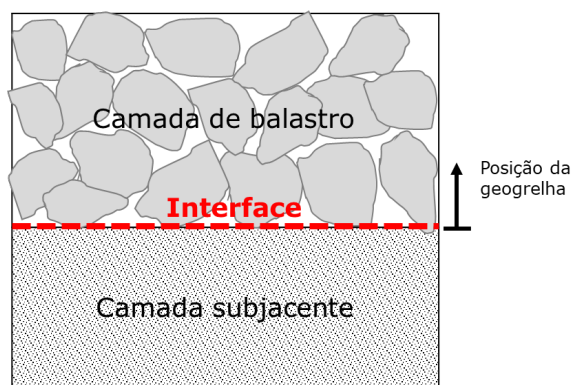


Figura 4.4 – Localização da interface.

A nomenclatura utilizada para identificar as geogrelhas e a sua localização na camada de balastro é a que se apresenta no Quadro 4.4.

Quadro 4.4 – Nomenclatura utilizada para identificar as geogrelhas e a sua localização no balastro.

Tipo de geossintético	Forma da abertura	Dimensão da abertura (mm)	Localização no balastro (mm)
G : geogrelha	Q : quadrangular	- Nas retangulares assume a forma a.b ; - Nas quadrangulares assume a forma a ;	- A localização no balastro assume a forma c ; - Quando existe a colocação de mais do que uma geogrelha em simultâneo, assume a forma c+d ;
Gc : geocompósito constituído por geotêxtil e geogrelha	R : retangular T : triangular	- Nas triangulares assume a forma a ; - a e b são as dimensões da abertura.	- c e d são as localizações da geogrelha medidas a partir da interface.
Outros:	Nas geogrelhas triaxiais, quando aparece 120 , refere-se ao hexágono elementar; 0G : camada de balastro novo sem geogrelha; +R : geogrelha com maior resistência/ -R : geogrelha menor resistência; (A) : balastro mais resistente/ (B) : balastro menos resistente; Reciclado : balastro reciclado; 40% contaminado : camada de balastro 40% contaminada; Saturado : partículas de balastro saturadas; Areia : camada de areia na interface.		

Por exemplo: **GQ(+R)65/100+200(A)** representa uma geogrelha (**G**), com uma malha quadrada (**Q**), mais resistente (**+R**), de 65mm de abertura (**65**), localizada simultaneamente a 100 e a 200mm da interface (**100+200**), numa camada com balastro mais resistente (**A**).

Os tópicos analisados são apresentados em termos de melhorias calculadas com base na Equação 4.1.

$$M = \frac{P_{sem\ geossintético} - P_{com\ geossintético}}{P_{sem\ geossintético}} \times 100 \quad \text{Equação 4.1}$$

Onde:

M – Melhoria do tópico em estudo com o reforço/ estabilização (%);

$P_{sem\ geossintético}$ – Valor do tópico em estudo para a situação não reforçada/ estabilizada;

$P_{com\ geossintético}$ – Valor do tópico em estudo para a situação reforçada/ estabilizada.

4.3.2. Assentamento da camada de balastro

A Figura 4.5 compila os resultados relatados na bibliografia, em termos de melhoria do assentamento da camada de balastro reforçada/ estabilizada com geogrelhas.

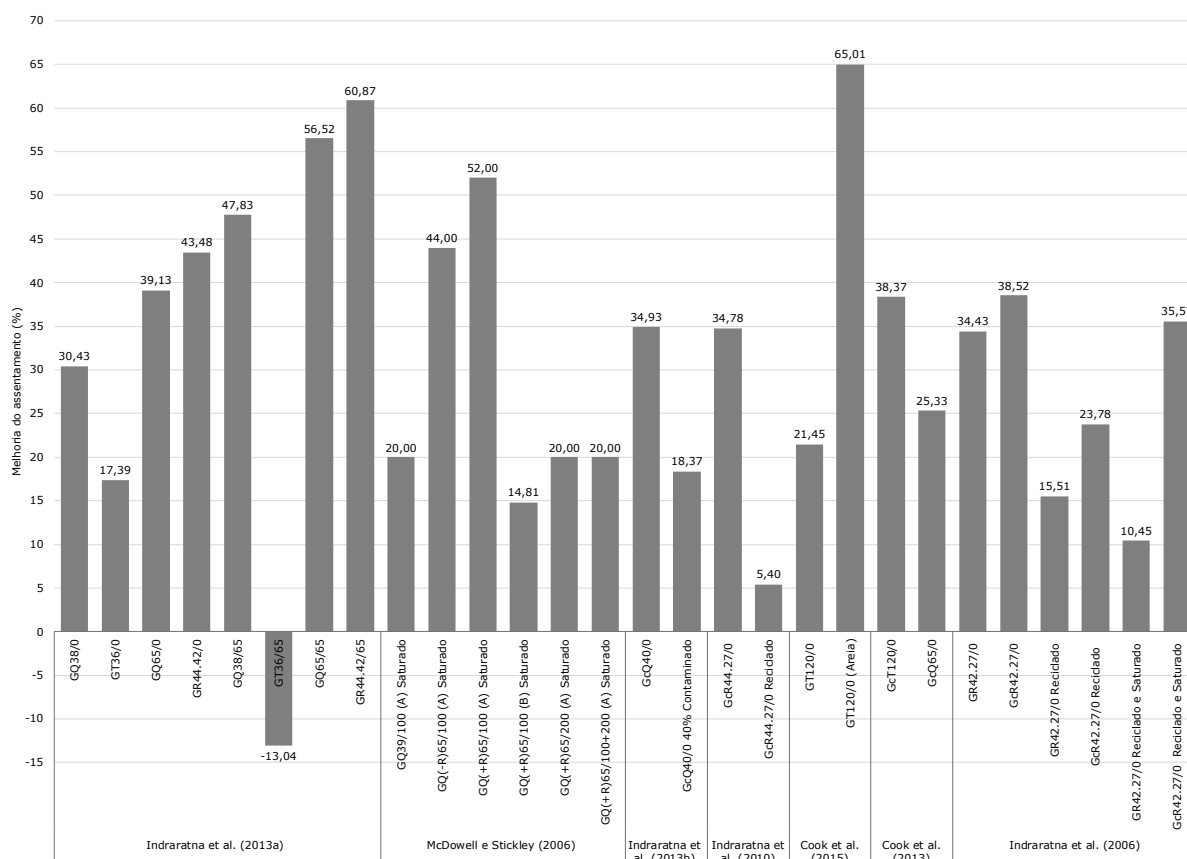


Figura 4.5 – Melhorias do assentamento da camada de balastro.

Verifica-se que a colocação de geogrelhas na camada de balastro contribuiu, de uma forma geral, para a redução do assentamento, à exceção do resultado obtido por Indraratna et al. (2013a). Verificou-se, neste caso, que com a colocação da geogrelha GT36/65, o assentamento piorou em 13%, o que foi atribuído ao mau imbricamento entre o balastro e a geogrelha, salientando, assim, a importância da relação entre a dimensão da abertura da malha da geogrelha e a dimensão do balastro (A/D).

Relativamente à forma da abertura da malha da geogrelha, a aplicação de geogrelhas biaxiais, com aberturas retangulares e quadrangulares, contribuiu para uma melhoria média de 30% e 33%, respetivamente. A colocação de geogrelhas triaxiais contribuiu para uma melhoria média de 36%. Sendo que, a aplicação de geogrelhas biaxiais, com uma malha quadrada de 65mm, na camada de balastro contribuiu para uma melhoria média de 34%, enquanto que a colocação de geogrelhas triaxiais, com hexágonos elementares de 120mm, contribuiu para uma melhoria média de 42%.

Constatou-se, também, que a saturação das partículas de balastro afeta o comportamento da camada de balastro, na medida em que a presença de água funciona como um lubrificante, reduzindo o atrito entre partículas (McDowell e Stickley, 2006). Consequentemente, a melhoria do assentamento da camada de balastro quando reforçada/ estabilizada com geogrelha é, nestes casos, mais reduzida, sendo em média de 27%.

Cook et al. (2015) observou que a colocação da geogrelha sobre uma camada de 20cm de areia contribuiu para uma redução de 65% do assentamento.

Indraratna et al. (2013b) verificou que a eficácia da geogrelha reduz com o aumento da contaminação do balastro, visto que os finos se acumulam nas aberturas da geogrelha, reduzindo a sua abertura efetiva. Para uma contaminação de 40% a eficácia da geogrelha reduziu de 35% (não contaminado) para 18%.

Os resultados obtidos pelos autores indicam, também, que a colocação de uma geogrelha na camada de balastro reciclado contribuiu para uma redução média do assentamento de 18%. Quando colocada numa camada de balastro novo, verificou-se uma melhoria média de 35%.

4.3.3. Deslocamento horizontal do balastro e resistência lateral da via

A Figura 4.6 resume as melhorias obtidas no deslocamento horizontal do balastro com a colocação de geogrelhas.

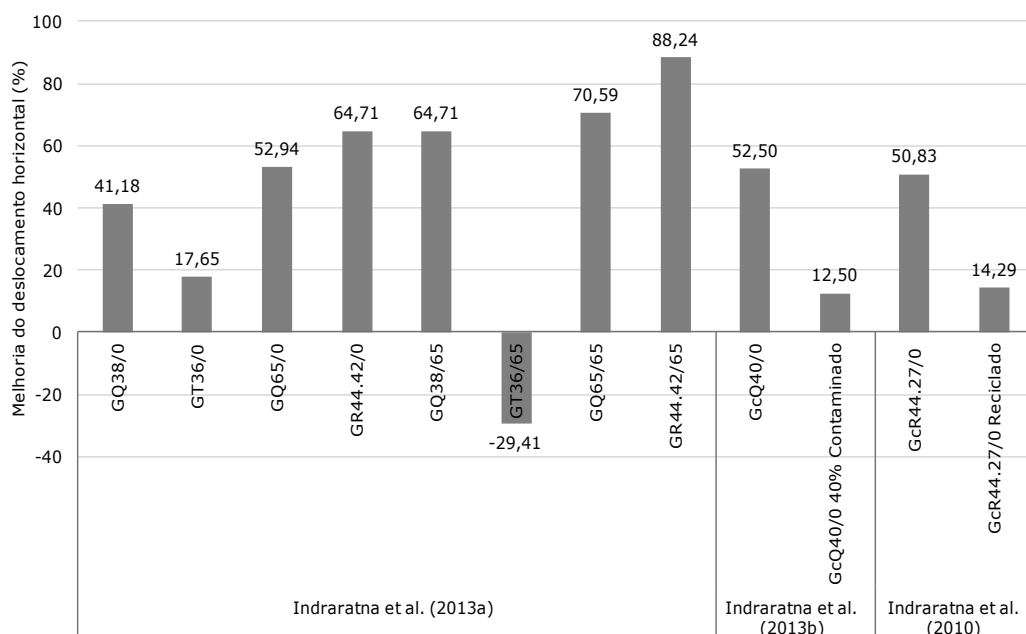


Figura 4.6 – Melhorias do deslocamento horizontal do balastro.

De um modo geral, a colocação de geogrelhas na camada de balastro reduziu o deslocamento horizontal do balastro, exceto no caso da colocação da geogrelha GT36/65, estudada por Indraratna et al. (2013a), que foi atribuído ao mau imbricamento entre o balastro e a geogrelha, à semelhança do tópico anterior.

A colocação de geogrelhas contribuiu para uma melhoria média do deslocamento horizontal de 56% em camada de balastro novo e de 14% em balastro reciclado. Isto sugere que existe uma melhor interação entre o balastro novo e a geogrelha.

Indraratna et al. (2013b) verificou que o deslocamento horizontal do balastro, apesar de melhorar com a colocação da geogrelha, aumenta com a contaminação da camada. Os finos funcionam

como lubrificante, reduzindo o atrito entre as partículas de balastro. A partir de 40% de contaminação as melhorias no deslocamento horizontal tornaram-se muito reduzidas.

Esmaeili et al. (2017) estudou o deslocamento horizontal do balastro com a introdução de geogrelhas, apresentando os resultados em termos de resistência lateral da via. Verificou que a colocação de geogrelhas na camada de balastro contribuiu para uma melhoria média de 36% na resistência lateral da via.

4.3.4. Esforços na interface

A Figura 4.7 mostra os resultados relatados para as melhorias obtidas nos esforços com a colocação de geogrelhas na camada de balastro.

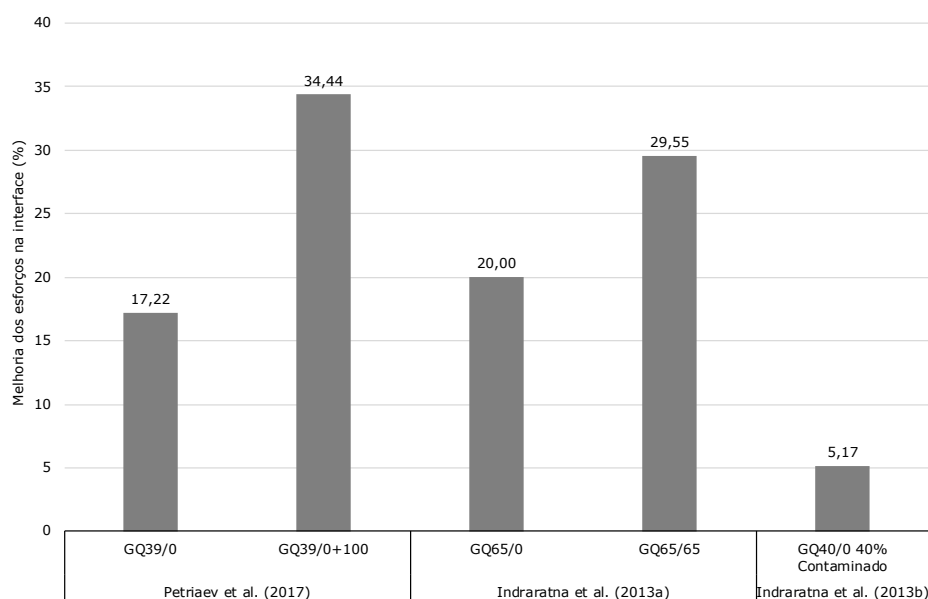


Figura 4.7 – Melhoria nos esforços na interface.

Verifica-se que a colocação de geogrelhas na camada de balastro contribuiu para a redução dos esforços no topo da subestrutura, verificando-se, em média, uma melhoria de 21%. Esta melhoria contribui para que ocorra uma redução dos esforços na subestrutura, especialmente importante quando as vias são construídas em solos geotecnicaamente fracos, como por exemplo solos argilosos.

4.3.5. Deformabilidade vertical da via

Liu et al. (2016) verificou que para uma situação não reforçada/ estabilizada, a rigidez decresceu inicialmente e aumentou de forma constante a partir dos 100 ciclos. Por outro lado, quando foi introduzida uma geogrelha, a rigidez rapidamente atingiu um patamar constante devido ao imbricamento do balastro nas aberturas da geogrelha.

Hornicek et al. (2017) verificou, em campo através de um ensaio de carga, que a colocação de uma geocompósito (geogrelha triaxial e geotêxtil) contribuiu para uma melhoria média de 60% do módulo de deformabilidade da via.

A colocação de uma geogrelha na camada de balastro contribuiu, de uma forma geral, para a redução das deformações da camada devido ao imbricamento do balastro nas aberturas da malha da geogrelha.

4.3.6. Deflexão do carril

A medição da deflexão no topo do carril foi feita em campo antes e após a colocação de geogrelhas. A Figura 4.8 apresenta as melhorias na deflexão obtidas com a introdução de geogrelhas na camada de balastro.

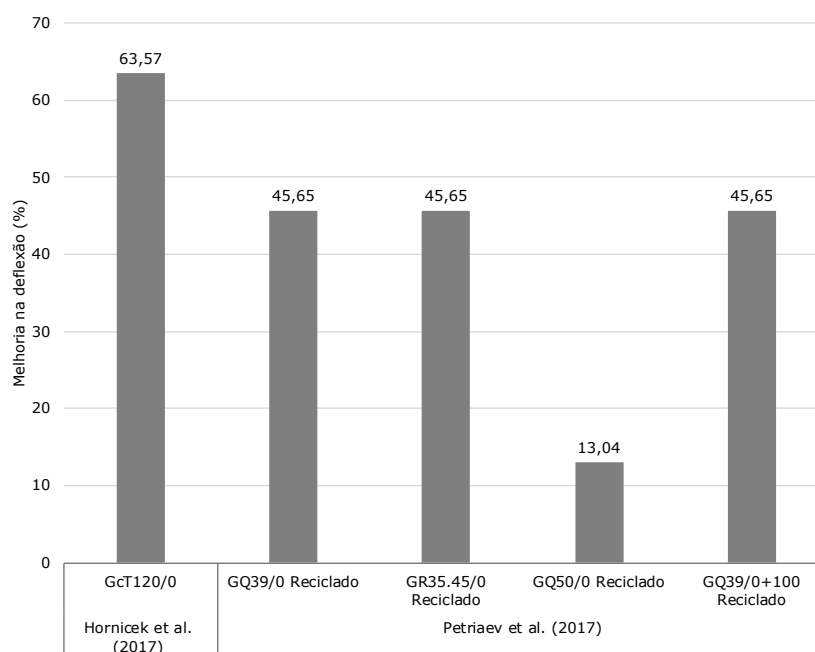


Figura 4.8 – Melhorias obtidas na deflexão do carril.

Verificou-se que a colocação de geogrelhas na interface reduz as deflexões do carril quando a passagem do material circulante. A colocação de uma geogrelha triaxial com um hexágono elementar de 120mm contribuiu para uma redução de 64% da deflexão do carril e a colocação de uma geogrelha com aberturas quadrangulares de 39mm para uma redução de 46%, sugerindo a importância do papel das geogrelhas no comportamento da camada de balastro.

4.3.7. Fragmentação do balastro

A Figura 4.9 apresenta as melhorias da fragmentação com a colocação de geogrelhas na camada de balastro obtidas por Indraratna et al. (2013a). Para este efeito, o autor utilizou o *Ballast Breakage Index* (BBI), que consiste no cálculo de áreas entre curvas granulométricas antes e após o carregamento e na definição de um limite máximo de fragmentação.

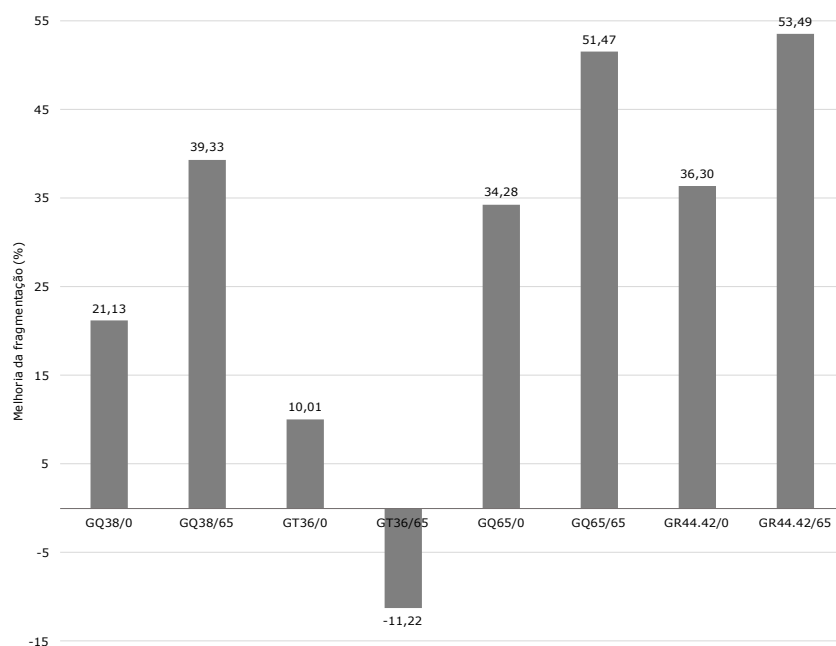


Figura 4.9 – Melhorias obtidas na fragmentação do balastro.






Verifica-se que a fragmentação do balastro é reduzida com a colocação de geogrelhas. De salientar que, a colocação de uma geogrelha na interface e a 65mm acima desta resulta numa melhoria de 25% e 48%, respetivamente. À semelhança dos resultados anteriores, a introdução da geogrelha GT36/65 agravou a fragmentação devido ao fraco imbricamento entre o balastro e a geogrelha.

4.3.8. Síntese dos resultados analisados

O Quadro 4.5 e o Quadro 4.6 apresentam de forma resumida as melhorias médias obtidas com a aplicação de geogrelhas na camada de balastro.

O Quadro 4.5 apresenta as melhorias em função do tipo de análise (laboratório ou campo) e da forma da abertura da malha da geogrelha, salientando as geogrelhas mais utilizadas em ferrovias.

Quadro 4.5 – Quadro resumo das melhorias com a aplicação de geogrelhas na camada de balastro.

Tópico	Melhorias com a aplicação de geogrelha (%)		Melhorias tendo em conta a forma da abertura da malha da geogrelha (%)			Melhorias com geogrelhas com aplicação prática em ferrovias (%)	
	Laboratório	Campo					
						65x65mm	55x55x55mm ⁽¹⁾
Assentamento da camada de balastro	10 a 65 (33)	5 a 35 (20)	5 a 61 (30)	15 a 57 (33)	17 a 65 (36)	15 a 57 (34)	21 a 65 (42)
Deslocamento horizontal do balastro	18 a 88 (57)	14 a 51 (32)	13 a 88 (55)	41 a 71 (56)	#	53 a 71 (62)	*
Resistência lateral da via	8 a 40 (36)	34 a 42 (38)	*	8 a 42 (31)	*	*	*
Fragmentação do balastro	0,7 a 53 (25)	*	0,7 a 53 (34)	2 a 51 (19)	#	2 a 51 (18)	*
Deflexão do carril	*	43	46	30	64	*	64
Esforços na interface	5 a 30 (18)	17 a 34 (26)	*	5 a 34 (21)	*	20 a 30 (25)	*

Legenda: * não foi estudado pelos autores; # amostra não representativa; () valor médio; ⁽¹⁾ corresponde a um hexágono elementar de 120mm

Constata-se que, de uma forma geral, as melhorias foram mais significativas com a colocação de geogrelhas triaxiais com uma abertura de 55mm na camada de balastro do que com as geogrelhas biaxiais com uma malha de 65mm, em termos de assentamento.

O Quadro 4.6 apresenta as melhorias obtidas com a colocação de geogrelhas em função das características do balastro, relativamente à construção da camada com balastro novo ou reciclado, bem como com as alterações destas durante a exploração (contaminação e saturação).

Quadro 4.6 – Melhorias tendo em conta o tipo de balastro e as condições da camada de balastro com a aplicação de geogrelhas.

Tópico	Construção		Exploração	
	Novo	Reciclado	40% contaminado	Saturado
Assentamento da camada de balastro	15 a 65 (35)	5 a 36 (18)	18	15 a 65 (27)
Deslocamentos horizontais do balastro	18 a 88 (56)	14	13	*
Resistência lateral da via	8 a 40 (36)	34 a 42 (38)	*	*
Fragmentação do balastro	0,7 a 54 (20)	42 a 50 (46)	6,25	2 a 50 (18)
Deflexão do carril	64	13 a 46 (38)	*	*
Esforços na interface	5 a 30 (18)	17 a 34 (26)	5,17	*

Legenda: *- não foi estudado pelos autores; () – valor médio.

No que diz respeito à fase de construção da camada, com a colocação de geogrelhas, verifica-se que, de uma forma geral, ocorreram melhorias dos parâmetros incluídos no Quadro 4.6, quer no caso do balastro novo, quer para balastro reciclado.

No que se refere à fase de exploração, ocorreu igualmente uma melhoria nos parâmetros estudados.

4.4. INTERAÇÃO BALASTRO-GEOGRELHA

4.4.1. Influência da localização da geogrelha

A influência da localização da geogrelha na camada de balastro tem sido estudada por diversos autores, tal como se observa no Quadro 4.7. Os tópicos analisados são também indicados no referido quadro.

Quadro 4.7 – Influência da localização da geogrelha.

Localização a partir da interface (Figura 4.4) (mm)	Melhorias (%)					Referências
	Assentamento	Fragmentação do balastro	Resistência lateral da via	Deslocamento horizontal	Esforços na interface	
0	5 a 65 (30)	0,7 a 50 (26)	*	13 a 65 (38)	5 a 34 (19)	Petriaev et al. (2017); Petriaev (2017); Hornicek et al. (2017); Cook et al. (2013); Cook et al. (2015); Indraratna et al. (2013a); Indraratna et al. (2013b); Indraratna et al. (2010); Indraratna et al. (2006)
65/ 1,23D _{máx}	48 a 61 (55)	39 a 54 (48)	*	65 a 88 (75)	30	Indraratna et al. (2013a)
100/ 1,59D _{máx}	15 a 52 (33)	4 a 8 (6)	8	*	*	Esmaili et al. (2017); McDowell e Stickley (2006)
200/ 3,17D _{máx}	20	2	31 a 34 (33)	*	*	Esmaili et al. (2017); McDowell e Stickley (2006)
100+200	20	#	40 a 42 (41)	*	*	Esmaili et al. (2017); McDowell e Stickley (2006)

*- não foi estudado na bibliografia; #- amostra não representativa; () – valor médio;
D_{máx} - dimensão máxima do balastro.

Verifica-se que, em termos de assentamento, a colocação de uma geogrelha a 65mm da interface melhorou em 55% o assentamento. A colocação da geogrelha a 100mm da interface também contribuiu

com melhorias no assentamento do balastro, embora mais reduzidas (33%). A localização da geogrelha que mais contribuiu para um menor assentamento da camada de balastro situa-se entre a interface e no máximo a $1,23-1,59D_{\text{máx}}$ (onde $D_{\text{máx}}$ é a dimensão máxima do balastro) desta. A colocação de duas geogrelhas em simultâneo, a 100 e a 200mm, e apenas a 200mm da interface, contribui com melhorias menos significativas, em termos de assentamento.

Relativamente à fragmentação, a que teve melhor desempenho foi a localizada a 65mm da interface, com uma melhoria média de 48%.

No que se refere à resistência lateral da via, verifica-se que quanto mais afastada da interface, melhor é a estabilização lateral da via. A colocação de duas geogrelhas em simultâneo melhorou em 41% a resistência lateral da via.

No que diz respeito ao deslocamento horizontal do balastro, a colocação de uma geogrelha na interface e a 65mm desta melhorou este em 38% e 75%, respetivamente. Isto sugere que tanto as partículas de balastro acima da geogrelha como aquelas que situam abaixo desta ficam imbricadas nas aberturas da geogrelha, melhorando o imbricamento e o confinamento.

Em termos de esforços na interface, a colocação de uma geogrelha a 65mm da interface parece contribuir para uma redução mais significativa dos esforços, em 30%.

4.4.2. Influência da presença de um geotêxtil adicional

Em obra, é, muitas vezes, colocado um geotêxtil na interface entre a camada de balastro e a subestrutura com a função de filtragem e separação, de modo a impedir que ocorra ascensão de materiais das camadas subjacentes para a camada de balastro. Contudo, a presença de um geocompósito, constituído por um geotêxtil, acoplado de fabrico à geogrelha ou colocado separadamente, pode influenciar negativamente o reforço/ estabilização. O geotêxtil impede, de certa forma, a penetração das partículas de balastro nas aberturas da geogrelha, originando, assim, um menor imbricamento (Lopes, 2009).

Indraratna et al. (2013b), Cook et al. (2013), Indraratna et al. (2010) e Indraratna et al. (2006) estudaram a influência da colocação de um geocompósito no comportamento da camada de balastro. A Figura 4.10 apresenta as melhorias médias do assentamento obtidas pelos diferentes autores com a colocação de um geocompósito e apenas com a geogrelha na camada de balastro.

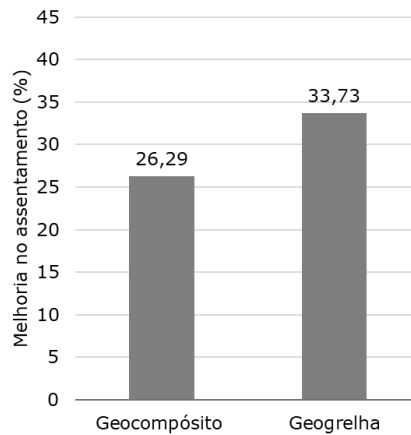


Figura 4.10 – Influência da presença de um geocompósito no assentamento.

Verifica-se que a presença de um geocompósito tem uma menor contribuição para a melhoria do assentamento, face à utilização de apenas da geogrelha, devido às razões mencionadas anteriormente.

Com a colocação de um geocompósito obtiveram-se melhorias médias na ordem dos 26% e com a colocação da geogrelha (apenas) obtiveram-se melhorias médias na ordem dos 34%, no assentamento da camada de balastro.

4.4.3. Relação entre a dimensão da abertura da geogrelha e a dimensão do balastro

As geogrelhas utilizam os efeitos de imbricamento e de confinamento dos agregados nas suas aberturas de forma a reforçar e/ou estabilizar a camada onde estão inseridas. O movimento dos agregados na superfície da geogrelha, ou nas suas aberturas, desempenha um papel fundamental no seu funcionamento. Esta interação depende de diversos fatores, sendo as propriedades da geogrelha, dos agregados e as condições de carregamento aqueles que mais influenciam o seu comportamento (Han et al., 2017).

A interação agregado-geogrelha pode ser analisada tendo em conta o coeficiente de eficiência da resistência ao corte (α). Este coeficiente é obtido pelo quociente entre a resistência ao corte do agregado com geogrelha ($\tau_{\text{agregado-geogrelha}}$) e a resistência ao corte do agregado sem geogrelha ($\tau_{\text{agregado-agregado}}$). Quanto maior for o valor de α , maior é a eficácia da geogrelha: sempre que $\alpha > 1$ ocorre um melhoramento da resistência e quando $\alpha < 1$ não ocorre imbricamento do agregado na geogrelha, ou o imbricamento é fraco (Indraratna et al., 2012).

A resistência ao corte do conjunto agregado-geogrelha depende de dois fatores: da resistência ao corte das partículas imbricadas na geogrelha e da resistência ao corte entre as partículas e a superfície da geogrelha. As suas magnitudes dependem do grau de imbricamento e da área de contato entre as partículas e a superfície da geogrelha.

A dimensão das partículas de agregado e das aberturas da geogrelha tomam, assim, uma elevada importância na resistência ao corte (Han et al., 2017):

- Se o agregado tiver dimensões superiores às da abertura da geogrelha, não a atravessam, ficando apoiados nela (Figura 4.11a). O comportamento da geogrelha seria, neste caso, análogo ao de um geossintético contínuo (por exemplo, um geotêxtil);
- Quando a dimensão do agregado se aproxima da dimensão das aberturas da geogrelha (Figura 4.11b), estes atravessam as aberturas ficando imbricados. As barras da geogrelha confinam os agregados e este efeito de confinamento propaga-se aos agregados vizinhos;
- Quando as dimensões dos agregados são demasiado pequenas face às aberturas da geogrelha, estes passam totalmente através delas e o efeito de imbricamento é fraco (Figura 4.11c).

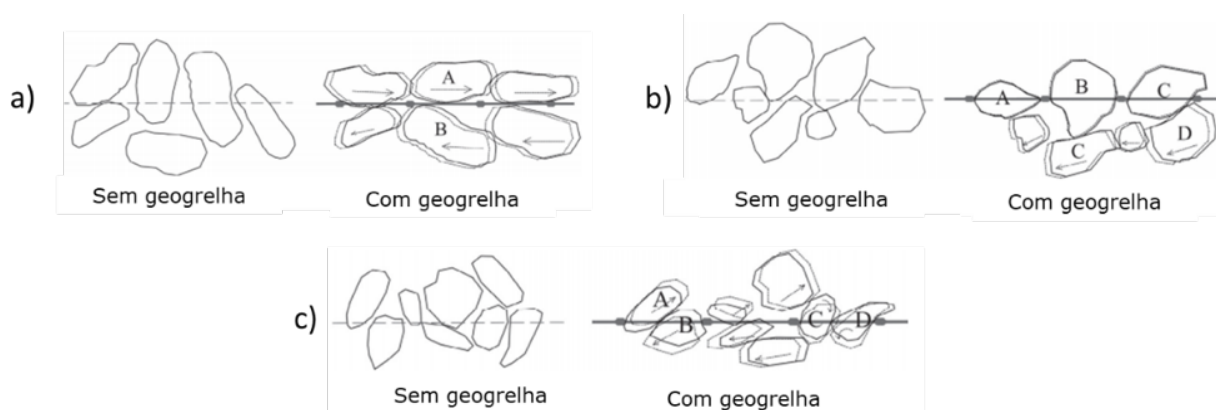


Figura 4.11 – Importância da dimensão do agregado e da dimensão da abertura da geogrelha (Han et al., 2017).

Kwan (2006) refere que a importância da relação A/D ultrapassa a importância da resistência da geogrelha. Este autor verificou que para uma geogrelha com aberturas quadrangulares de 32mm e uma resistência de 40kN/m e para uma geogrelha com aberturas quadrangulares de 65mm e uma resistência de 20kN/m, a segunda, embora tenha uma resistência inferior à primeira, devido a um melhor imbricamento das partículas de balastro, mobilizou uma resistência maior e uma força de arrancamento superior à primeira geogrelha (Figura 4.13a e b). Contudo, também verificou que para a mesma dimensão da abertura da geogrelha e diferentes resistências, ocorreu uma maior mobilização da resistência no caso da geogrelha que apresenta uma maior resistência à tração (Figura 4.13b e c).

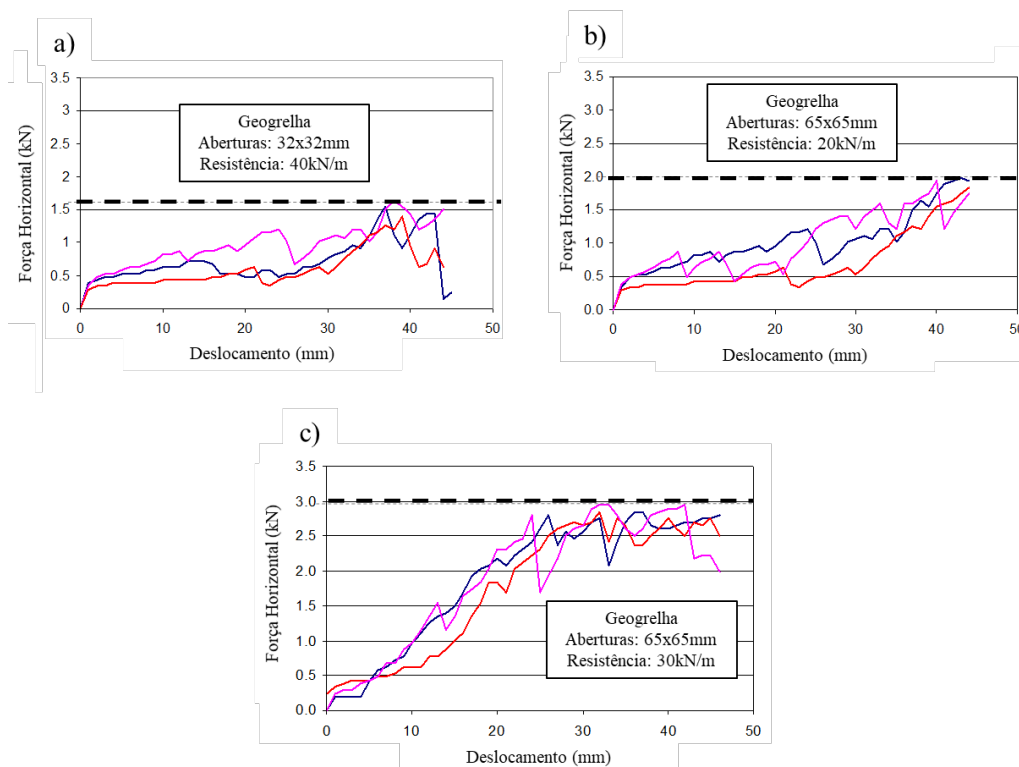


Figura 4.12 – Ensaio de arrancamento para uma força vertical de 0,5kN (adaptado de Kwan, 2006).

Por si só, a resistência da geogrelha não melhoraria o comportamento da camada sem um bom imbricamento. Porém, a resistência da geogrelha não deve ser descurada, na medida em que barras mais grossas e resistentes contribuem para um melhor confinamento (Kwan, 2006). Kwan (2006) refere que a aplicação de geogrelhas na camada de balastro pode aumentar os intervalos de manutenção até 2,5 vezes.

Indraratna et al. (2012) classificou o valor de A/D_{50} , tendo em conta o valor de α , em 3 zonas (Figura 4.13):

- FIZ – *Feeble Interlock Zone* (zona de fraco imbricamento): verifica-se uma fraca interação do agregado com a geogrelha, ocorrendo apenas o imbricamento de agregados mais pequenos. Esta zona é definida para valores de A/D_{50} entre 0 e 0,95;
- OIZ – *Optimum Interlock Zone* (zona ótima de imbricamento): verifica-se o imbricamento de partículas de dimensões próximas à da abertura da malha da geogrelha, levando o valor de α a ser superior à unidade;
- DIZ – *Diminishing Interlock Zone* (zona de imbricamento diminuto): verifica-se a redução do imbricamento, conduzindo a valores de α mais baixos (relativamente próximos de 1 quando A/D_{50} se aproxima de 2,5). O comportamento aproxima-se do caso não reforçado.

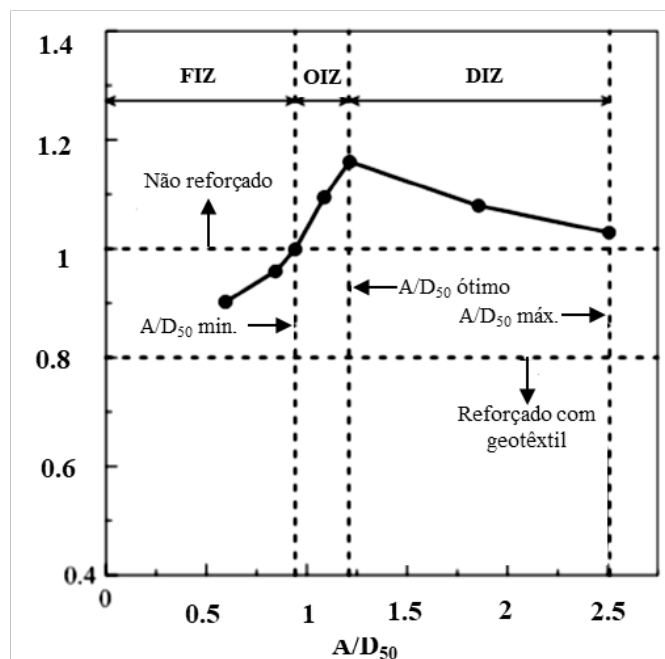


Figura 4.13 – Variação de α com o índice A/D_{50} .

Vários autores sugeriram relações entre a dimensão da abertura da malha da geogrelha e a dimensão do balastro (A/D), consoante o tipo de geogrelha, nomeadamente:

- Kwan (2006) sugere que ocorre um bom efeito de imbricamento, em geogrelhas biaxiais, se $A/D_{50} \geq 1,6$, onde D_{50} é a dimensão média do balastro;
- Indraratna et al. (2012) referiu que a abertura mínima recomendável da malha de uma geogrelha biaxial é $0,95D_{50}$ e a abertura máxima $2,5D_{50}$, referindo que a relação ótima será $1,15 \leq A/D_{50} \leq 1,30$;
- Indraratna et al. (2013a) sugeriu que se $A/D_{50} > 0,95$ a geogrelha deverá ser colocada a 65mm da interface e se $A/D_{50} < 0,95$ deverá ser colocada na interface;
- Han et al. (2017) sugeriu a relação $1,30 \leq A/D \leq 1,71$, para as geogrelhas biaxiais, e a relação $1,08 \leq A/D \leq 1,43$, para as para as geogrelhas triaxiais, sendo D igual às dimensões mínimas e máximas do balastro, e no caso das geogrelhas triaxiais, A igual ao diâmetro do círculo inscrito no triângulo;
- Sweta e Hussaini (2018) sugeriram que relação A/D_{50} deve ser próxima de 0,95, para geogrelhas triaxiais e de 1,54, para geogrelhas biaxiais, sendo A igual ao diâmetro do círculo inscrito no triângulo, para geogrelhas triaxiais, e à raiz quadrada da área da abertura, para geogrelhas biaxiais.

4.5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo foi dedicado ao estado do conhecimento sobre a aplicação de geogrelhas na camada de balastro com a função de reforço/ estabilização. Foram apresentadas as metodologias

utilizadas e os tópicos estudados pelos diferentes autores. Analisou-se, ainda, a interação balastro-geogrelha, considerando a influência da localização da geogrelha na camada de balastro, a influência da aplicação de um geotêxtil adicional e a relação entre a dimensão da abertura da malha da geogrelha e a dimensão do balastro

A aplicação de geogrelhas na camada de balastro parece contribuir favoravelmente, sobretudo, na redução do seu assentamento.

Os aspetos mais relevantes para a redução do assentamento são a abertura da malha da geogrelha (forma e dimensão), a sua localização na camada de balastro e a dimensão do agregado. De forma a maximizar a interação entre o balastro e a geogrelha, e melhorar o comportamento da camada de balastro, de acordo com a revisão bibliográfica realizada, a geogrelha deve ser colocada entre a interface balastro/ camada subjacente e, no máximo, a $1,23-1,59D_{\text{máx}}$ acima desta.

Quanto à abertura da malha da geogrelha e a dimensão do balastro, a relação A/D que otimiza o imbricamento ainda não é consensual. Contudo, os resultados obtidos pelos diferentes autores sugerem que o A/D deve situar-se entre 1,15 e 1,71, para uma geogrelha biaxial, e 0,95 e 1,43, para uma geogrelha triaxial. É, ainda, necessário ter atenção que uma proporção desajustada A/D_{50} pode não melhorar, e em caso extremo piorar, o comportamento da camada de balastro. No caso das geogrelhas triaxiais, o cálculo desta relação é realizado considerando diferentes parâmetros. Relativamente à dimensão da abertura da malha de uma geogrelha triaxial, para alguns autores corresponde ao maior diâmetro da circunferência inscrita no triângulo enquanto que para outros, corresponde à dimensão da barra. Para a dimensão do balastro, são consideradas a sua dimensão máxima, mínima ou, ainda, a sua dimensão média.

Ao longo do tempo e no decorrer da exploração da via, pode ocorrer contaminação da camada de balastro que reduz a eficácia da geogrelha.

De uma forma geral, os resultados analisados indicam que as melhorias do desempenho da camada de balastro com a aplicação de geogrelhas está relacionada com a interação entre o balastro e a geogrelha, isto é, com o imbricamento.

5. CASO DE ESTUDO

5.1. INTRODUÇÃO

As melhorias do desempenho da camada de balastro, com a aplicação de geogrelhas, parece depender essencialmente da interação entre o balastro e a geogrelha, que por sua vez depende da relação entre a dimensão da abertura da malha da geogrelha e a dimensão do balastro.

Este capítulo apresenta os modelos físicos considerados, os materiais e os equipamentos utilizados, o procedimento de ensaio, os resultados obtidos e a sua discussão.

Neste capítulo, é analisado o imbricamento das partículas de balastro nas aberturas de uma geogrelha, com o objetivo de definir uma relação entre a dimensão da abertura da geogrelha e a dimensão do balastro (A/D) que maximize o imbricamento, tendo em consideração a granulometria do balastro utilizado e a localização da geogrelha. Analisa-se, também, a influência da geogrelha no comportamento da camada de balastro. Por fim, são apresentadas algumas recomendações de boas práticas que envolvam a aplicação de geogrelhas na camada de balastro.

5.2. MATERIAIS E EQUIPAMENTOS

5.2.1. Modelos físicos

Foram realizados ensaios em cinco modelos físicos, os quais são esquematicamente apresentados no Quadro 5.1.

Os ensaios decorrem em duas fases. Na primeira fase (ensaios para a seleção do balastro), os ensaios foram realizados no modelo GT120/0, sumariamente constituído, da base para o topo, por uma camada de sub-balastro, uma geogrelha e uma camada de balastro, tendo como objetivo conhecer a dimensão das partículas imbricadas nas aberturas da geogrelha.

Os restantes modelos foram usados na segunda fase do trabalho (ensaios em modelos físicos). O modelo #0G é composto por uma camada de sub-balastro, uma camada de balastro selecionado em contacto com o sub-balastro e uma camada de balastro, tendo como objetivo servir de referência aos ensaios realizados nesta fase.

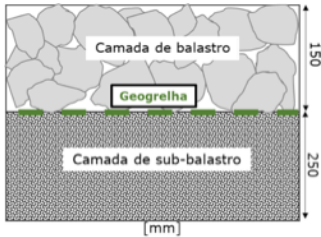
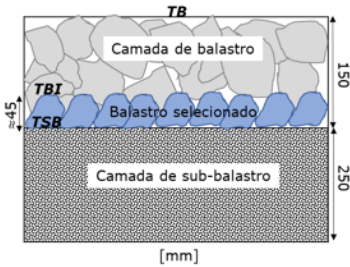
O modelo #GT120/0 é composto, da base para o topo, por uma camada de sub-balastro, por uma geogrelha na interface balastro/sub-balastro, uma camada de balastro selecionado e uma camada de balastro. Este modelo tem como objetivos analisar o imbricamento e o módulo de deformabilidade, tendo em consideração a influência da aplicação de uma camada de balastro selecionado em contacto com a geogrelha.

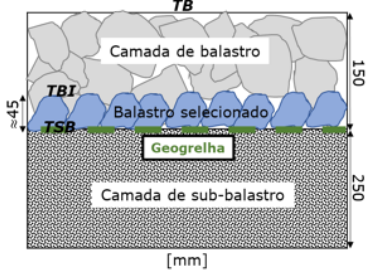
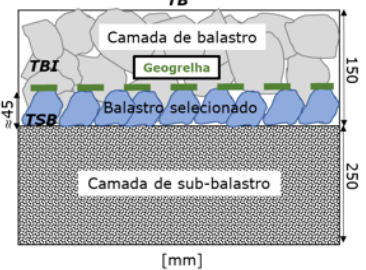
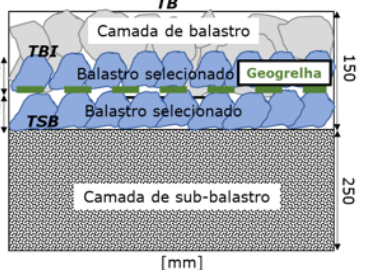
O modelo #GT120/45_1 é constituído, da base para o topo, por uma camada de sub-balastro, por uma geogrelha localizada a 45mm da interface, sobre uma camada de balastro selecionado, e uma camada de balastro, tendo como objetivos analisar o imbricamento e o módulo de deformabilidade.

O modelo #GT120/45_2 tem objetivos semelhantes ao modelo anterior, considerando a geogrelha aplicada entre duas camadas de balastro selecionado, a 45mm da interface balastro/sub-balastro.

O Quadro 5.1 mostra, ainda, as zonas onde foram medidos os módulos de deformabilidade, sendo: TSB, o topo da camada de sub-balastro, TB, o topo da camada de balastro, e TBI, o topo da camada de balastro imbricado.

Quadro 5.1 – Modelos físicos ensaiados.

Design.	GT120/0	#0G (Referência)
Fase	Ensaio para seleção do balastro (Fase 1)	Ensaio em modelos físicos (Fase 2)
Esquema		
Objetivos	<ul style="list-style-type: none"> – Análise preliminar do imbricamento, com vista a conhecer a dimensão das partículas imbricadas nas aberturas da geogrelha. 	<ul style="list-style-type: none"> – Modelo físico de referência da fase 2; – Análise do módulo de deformabilidade.

Design.	#GT120/0	#GT120/45_1	#GT120/45_2
Fase	Ensaio em modelos físicos (Fase 2)		
Esquema			
Objetivos	<ul style="list-style-type: none"> – Análise do imbricamento; – Influência do balastro de granulometria selecionada; – Análise do módulo de deformabilidade. 	<ul style="list-style-type: none"> – Análise do imbricamento; – Influência do balastro de granulometria selecionada colocado abaixo da geogrelha; – Influência da localização da geogrelha; – Análise do módulo de deformabilidade. 	<ul style="list-style-type: none"> – Análise do imbricamento; – Influência do balastro de granulometria selecionada colocado abaixo e acima da geogrelha; – Influência da localização da geogrelha; – Análise do módulo de deformabilidade.

5.2.2. Balastro

O balastro utilizado nos ensaios é de origem granítica e é balastro novo. O balastro foi ensaiado em termos de granulometria, de índice de forma, de índice de achatamento, de comprimento e de resistência à fragmentação, de forma a verificar se está de acordo com os requisitos presentes no documento técnico IT.GEO.001 (2004), tendo este os requisitos da norma NP EN 13450. O ANEXO 2 apresenta uma descrição mais detalhada dos ensaios efetuados.

A Figura 5.1 apresenta a curva granulométrica obtida para o balastro analisado, incluindo, também, os fusos granulométricos requeridos no IT.GEO.001 (2004).

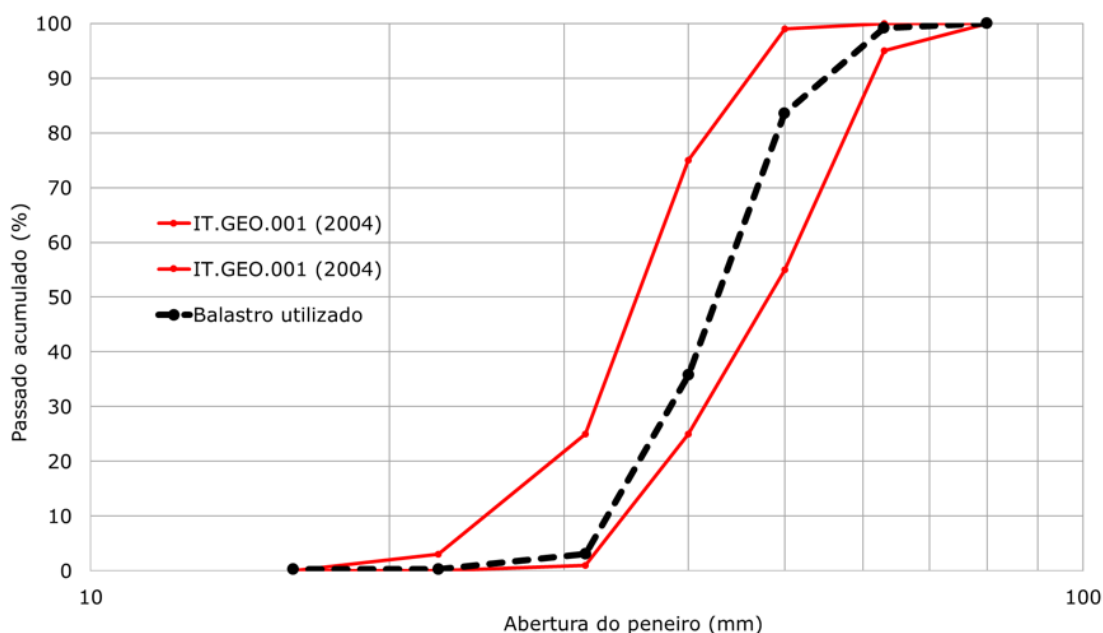


Figura 5.1 – Análise granulométrica do balastro utilizado e fusos granulométricos normativos.

Observa-se que a máxima dimensão, $D_{m\acute{a}x}$, do balastro utilizado nos ensaios é igual a 63mm, a sua mínima dimensão, $D_{m\acute{i}n}$, é igual a 31,5mm e a sua dimensão média, D_{50} , é igual a 43mm. Entende-se por $D_{m\acute{a}x}$, a dimensão do menor peneiro onde passa mais de 90% do material, por $D_{m\acute{i}n}$, a dimensão do maior peneiro onde passa menos de 5% do material, e por D_{50} , a dimensão do peneiro onde passa 50% do material. Quanto às partículas finas e aos finos presentes na amostra, a percentagem destes foi determinada tendo em conta o material que passa no peneiro de abertura de 0,5mm e de 0,063mm, respetivamente. A amostra ensaiada apresentou 0,17% de partículas finas e 0,12% de finos.

O Quadro 5.2 apresenta o resumo dos resultados obtidos para a caracterização do balastro ensaiado e os respetivos valores limites de aceitação sem restrições requeridos no IT.GEO.001 (2004).

Quadro 5.2 – Resumo da caracterização do balastro utilizado.

Caraterísticas		IT.GEO.001 (2004)	Balastro utilizado
Los Angeles (%)		≤16 (Tipo I) e ≤20 (Tipo II)	11 (Tipo I)
Granulometria	Peneiros (mm)	Passado acumulado (%)	Passado acumulado (%)
	80	100	100
	63	≥ 95 ≤ 99	99,2
	50	≥ 55 ≤ 99	83,4
	40	≥ 25 ≤ 75	35,8
	31,5	≥ 1 ≤ 25	3,1
	22,4	≤ 3	0,34
Partículas finas (%)		≤ 0,6	0,17
Finos (%)		≤ 0,5	0,12
Forma	Índice de achatamento (%)	≤ 15	9
	Índice de forma (%)	≤ 10	10
	Comprimento (%)	≤ 4	1
Elementos prejudiciais (%)		≤ 3	0

Verifica-se que todos os parâmetros analisados satisfazem os requisitos mencionados no IT.GEO.001 (2004).

5.2.3. Sub-balastro

O sub-balastro utilizado neste trabalho foi caracterizado pelo LNEC (2009), apresentando-se, na Figura 5.2, a sua análise granulométrica.

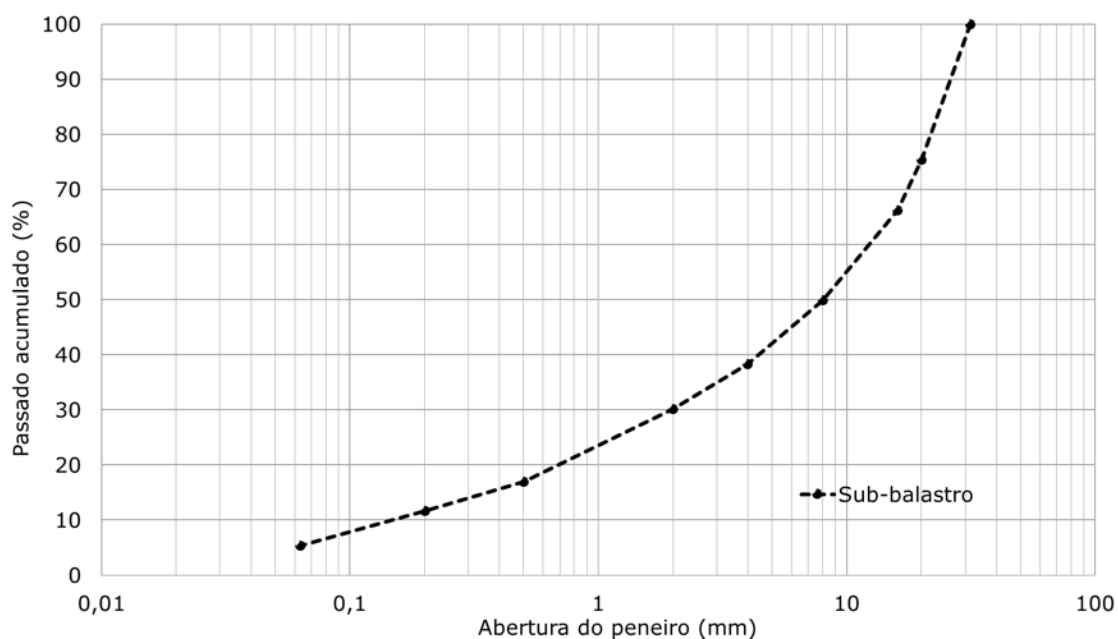


Figura 5.2 – Análise granulométrica do sub-balastro.

Observa-se que a máxima, a média e a mínima dimensões do sub-balastro são, respetivamente, 31,5mm, 8mm e 0,063mm.

5.2.4. Geogrelha

Foi utilizada uma geogrelha triaxial, de polipropileno, extrudida, com um hexágono elementar de 120mm e cujas barras têm 55mm de dimensão (Figura 5.3). As características da geogrelha são as que se apresentam no Quadro 5.3.

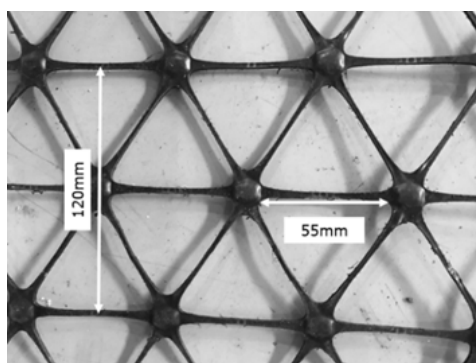


Figura 5.3 – Geogrelha utilizada.

Quadro 5.3 – Características da geogrelha utilizada (ETA12/0530, 2012).

Parâmetro	Valor
Rigidez radial a 0,5% de extensão	540kN/m
Eficácia das junções	100%
Abertura	55x55x55mm ⁽¹⁾
Massa por unidade de área	300g/m ²

⁽¹⁾ corresponde a um hexágono elementar de 120mm

5.2.5. Defletómetro de Impacto Ligeiro

Para a realização dos ensaios com o Defletómetro de Impacto Ligeiro (DIL) foi utilizado o equipamento PRIMA 100 LWD (Figura 5.4a). Na sequência dos trabalhos realizados por Bold (2011), utilizou-se uma placa extra (Figura 5.4b), de forma a evitar que o geofone entre em contacto com as partículas de balastro. Esta placa extra tem 300mm de diâmetro e 20mm de espessura.

Apenas foi utilizado o geofone central para a medição das deflexões do topo de cada camada ensaiada e foi utilizada uma massa móvel com 15kg.

O ANEXO 3 apresenta uma descrição mais detalhada do equipamento.

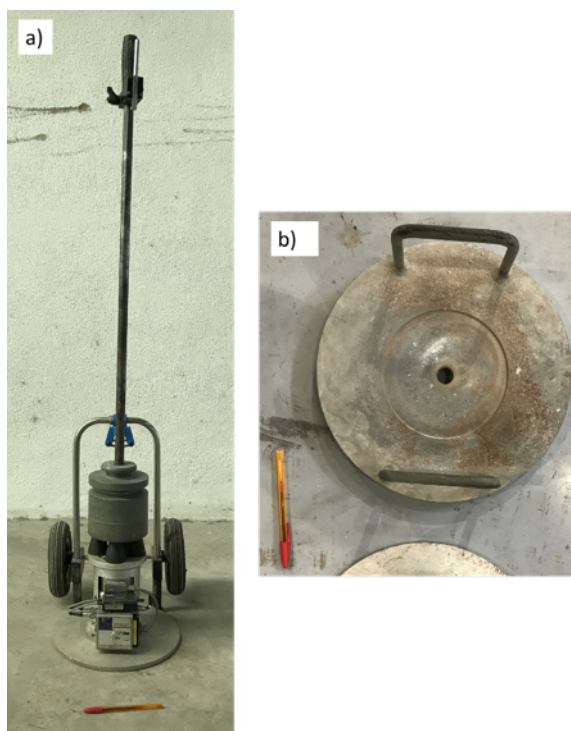


Figura 5.4 – a) PRIMA 100 LWD; b) placa extra.

5.3. PROCEDIMENTO DE ENSAIO

Os ensaios foram realizados numa fossa (Figura 5.5) com, aproximadamente, 1x1m, em planta, e com 0,30m de altura, onde se encontra a camada de sub-balastro. O ANEXO 4 apresenta alguns pormenores do procedimento de ensaio.



Figura 5.5 – Fossa de ensaio.

Relativamente à análise do imbricamento, em todos os modelos com geogrelha, foram contabilizadas o total das aberturas da geogrelha e as aberturas que continham no seu interior partículas imbricadas, com vista a calcular a percentagem de imbricamento.

Relativamente à determinação do módulo de deformabilidade, os ensaios consistiram em deixar cair uma massa de 15kg da altura máxima da haste guia (80cm), gerando uma força de, aproximadamente 14-15kN, obtendo-se, sob a placa de carga, tensões na ordem dos 200kPa. As tensões obtidas estão de acordo com o referido por Indraratna et al. (2010), em que para um comboio a 60km/h, as tensões variam, geralmente, entre 200 e 230kPa, na zona de contacto entre a travessa e o balastro. Em cada ensaio, antes de se dar início ao registo dos valores com o DIL, deixou-se cair a massa móvel 3 vezes, de forma a acomodar a placa de carga no topo do balastro. De seguida, deixou-se cair a massa móvel 10 vezes, registando-se os resultados.

Os módulos de deformabilidade foram determinados nas zonas indicadas nas figuras incluídas no Quadro 5.1, sendo (TB), o topo da camada de balastro, (TBI), o topo da camada de balastro imbricado e (TSB), o topo da camada de sub-balastro. Sempre que o DIL foi utilizado no topo do sub-balastro, foi colocada uma fina camada de areia, de forma a regularizar a superfície de contacto entre a placa de carga e o topo do sub-balastro.

O cálculo do módulo de deformabilidade foi feito com base na Equação 5.1 e a partir dos gráficos que relacionam a força aplicada e a deflexão, apresentando-se na Figura 5.6 um exemplo tipo desses gráficos.

$$E_{eq.} = \frac{A \times (1 - \nu^2) \times \rho \times a}{d_r} \quad \text{Equação 5.1}$$

Onde:

$E_{eq.}$ – Módulo de deformabilidade equivalente no centro (MPa);

A – Fator de rigidez da placa de carga ($A = 2$ para placas flexíveis e $A = \frac{\pi}{2}$ para placas rígidas);

ρ – Pressão de contacto (kPa);

d_r – Deflexão registada no geofone central (mm);

a – Raio da placa (mm);

ν – Coeficiente de Poisson.

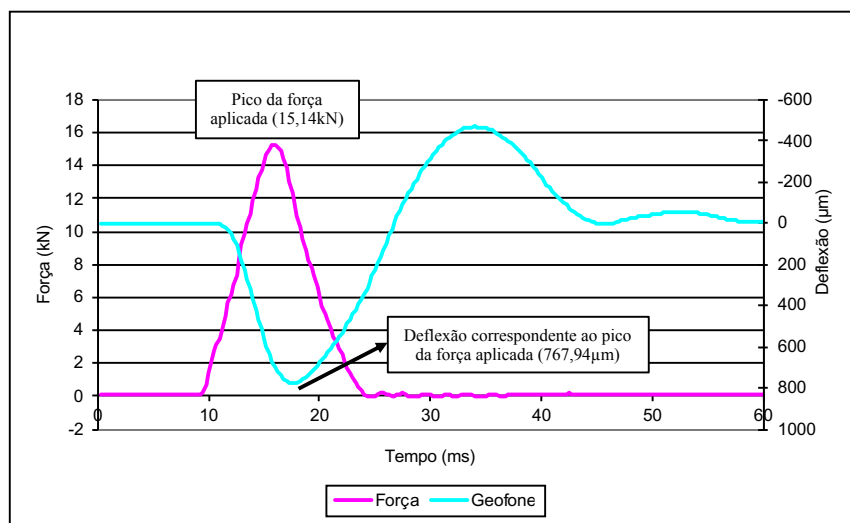


Figura 5.6 – Gráfico-tipo obtido com o DIL no topo do balastro, no modelo #GT120/0.

Observa-se que a deflexão máxima do topo da camada ensaiada corresponde à força máxima aplicada.

Considerou-se, para o sub-balastro e para o balastro, um coeficiente de Poisson igual a 0,3 e 0,2, respetivamente (Paixão, 2014).

De forma a obter-se um valor representativo do módulo de deformabilidade em cada zona de ensaio, considerou-se o valor que mais se aproxima da média do valor obtido para as últimas cinco quedas. De acordo com a ASTM E2583-07 (2015), os valores correspondentes a quedas, cuja variação da força de impacto seja superior a $\pm 3\%$ da força de impacto da queda anterior, devem ser rejeitados.

A Figura 5.7 apresenta, resumidamente, a sequência do trabalho experimental.

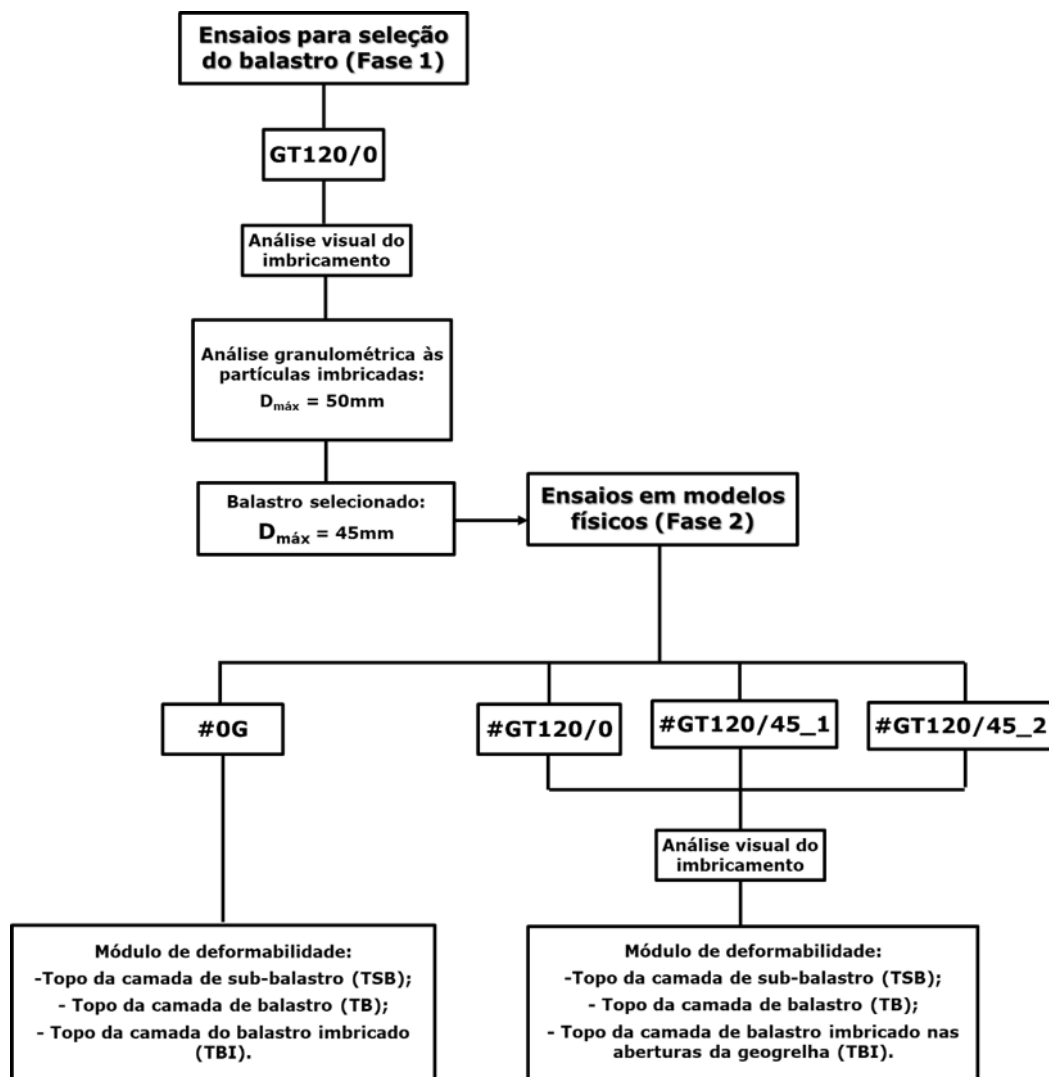


Figura 5.7 – Sequência dos ensaios.

5.4. RESULTADOS OBTIDOS

5.4.1. Ensaios para a seleção do balastro (Fase 1)

A Figura 5.8 apresenta o traçado das curvas granulométricas do balastro imbricado no modelo GT120/0, do balastro a utilizar na camada de granulometria selecionada e do balastro com granulometria especificada no IT.GEO.001 (2004).

Observou-se que a $D_{máx}$, a D_{min} e a D_{50} das partículas imbricadas nas aberturas da geogrelha, no modelo GT120/0, são 50mm, 31,5mm e 40,46mm, respetivamente.

Apesar de $D_{máx}$ ser igual a 50mm, observou-se que a maioria das partículas imbricadas (80%) tem dimensão inferior a 45mm. Assim, com vista a maximizar o número de partícula imbricadas, e tendo em consideração a dimensão da abertura da geogrelha igual a 55mm (dimensão da barra da geogrelha), reduziu-se a máxima dimensão das partículas constituintes da camada de balastro com granulometria selecionada, aqui designada por camada de balastro selecionado, a utilizar na segunda fase, para 45mm. Observou-se que a $D_{máx}$, a D_{min} e a D_{50} do balastro selecionado são 45mm, 31,5mm e 36,6mm, respetivamente.

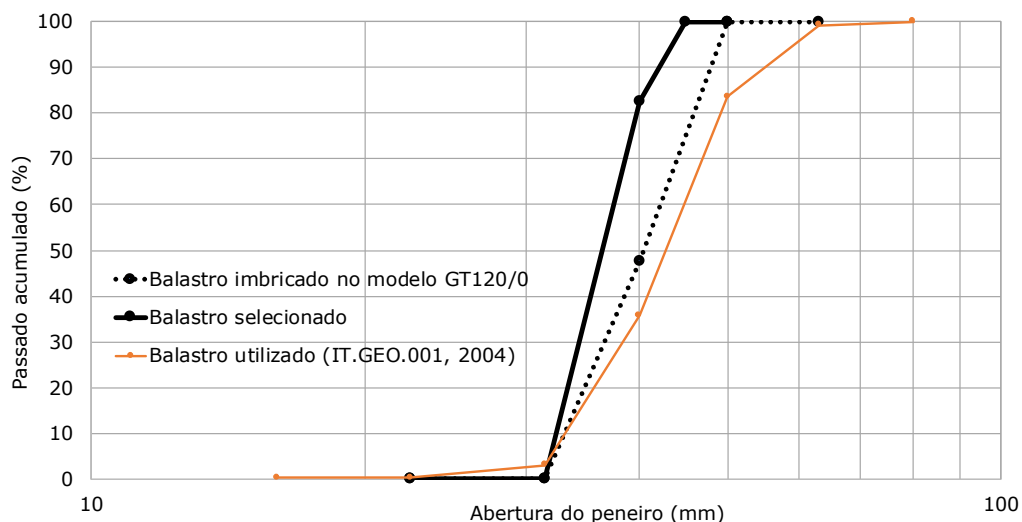


Figura 5.8 – Análise granulométrica do balastro imbricado no modelo GT120/0, do balastro com granulometria selecionada e do balastro com granulometria especificada no IT.GEO.001 (2004).

O Quadro 5.4 apresenta o número de partículas imbricadas e o número total de aberturas consideradas, com vista a calcular a percentagem de imbricamento, no modelo GT120/0.

Quadro 5.4 – Quantificação do imbricamento no modelo GT120/0.

	Quantidade
Aberturas	312
Partículas imbricadas	153

Obteve-se, para este modelo, 49% de imbricamento.

A Figura 5.9 apresenta alguns exemplos de partículas imbricadas nas aberturas da geogrelha, no modelo físico GT120/0.



Figura 5.9 – Exemplo de partículas imbricadas no modelo GT120/0.

5.4.2. Ensaio em modelos físicos (Fase 2)

5.4.2.1. Imbricamento

O Quadro 5.5 resume os resultados obtidos em termos de percentagem de imbricamento, bem como a contabilização das aberturas consideradas, na segunda fase, nos diferentes modelos ensaiados, usando o balastro de granulometria selecionada em contacto com a geogrelha.

Quadro 5.5 – Análise do imbricamento

Modelo	#GT120/0	#GT120/45_1	#GT120/45_2
Total de aberturas	312	312	312
Aberturas com partículas imbricadas	274	202	287
Percentagem de imbricamento	88%	65%	92%

Verifica-se que o imbricamento varia da seguinte forma:

- aumenta de 49% (GT120/0) para 88% (#GT120/0), quando é aplicada uma camada de balastro selecionado sobre a geogrelha, localizada na interface balastro/sub-balastro;
- aumenta de 49% (GT120/0) para 65% (#GT120/45_1), quando a geogrelha é aplicada sobre uma camada de balastro selecionado, a 45mm da interface balastro/ sub-balastro;
- aumenta de 65% (#GT120/45_1) para 92% (#GT120/45_2), quando a geogrelha é aplicada entre duas camadas de balastro selecionado, a 45mm da interface balastro/ sub-balastro.

Estes resultados evidenciam que a percentagem de imbricamento melhora quando é aplicada uma camada de balastro selecionado sobre a geogrelha, sendo esta melhoria ainda mais significativa quando a geogrelha é, também, aplicada a 45mm da interface. Observou-se, neste caso, que pode ocorrer imbricamento quer pelas partículas situadas acima da geogrelha, quer pelas situadas abaixo desta.

A Figura 5.10 apresenta alguns exemplos de partículas imbricadas nos diferentes modelos considerados nesta fase.

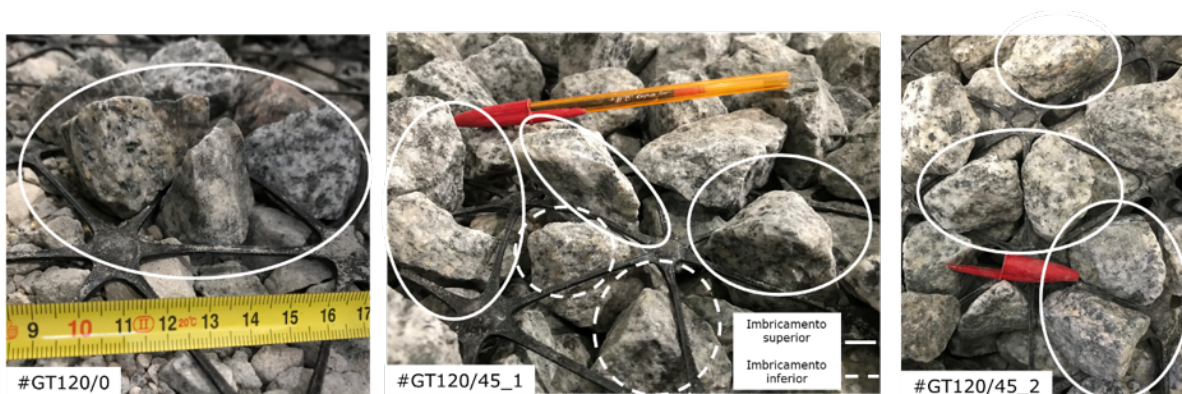


Figura 5.10 – Exemplos de partículas imbricadas nos modelos ensaiados na fase 2.

O ANEXO 5 apresenta mais exemplos de partículas imbricadas nos diferentes modelos ensaiados.

5.4.2.2. Deflexões e módulo de deformabilidade

O Quadro 5.6 apresenta as deflexões mínima, máxima e média, obtidas nos diferentes modelos ensaiados, no topo do sub-balastro (TSB), no topo da camada de balastro (TB) e no topo da camada de balastro imbricada (TBI).

Quadro 5.6 – Valores da deflexão obtidos com o DIL, para as últimas cinco quedas.

Modelo	Deflexão (μm)	Topo da camada de balastro (TB)	Topo da camada imbricada (TBI)	Topo do sub-balastro (TSB)
#0G	Mínima	786,55	592,90	519,27
	Máxima	881,57	617,02	543,13
	Média	815,67	600,87	530,79
#GT120/0	Mínima	703,12	779,03	563,58
	Máxima	765,13	822,92	579,49
	Média	739,36	803,63	570,45
#GT120/45_1	Mínima	794,39	1117,64	520,85
	Máxima	832,98	1183,86	539,42
	Média	812,21	1156,95	531,80
#GT120/45_2	Mínima	740,47	1117,63	535,92
	Máxima	771,30	1071,26	546,87
	Média	758,36	1181,18	541,56

Observa-se que os valores de deflexão obtidos no topo do sub-balastro (TSB) são semelhantes em todos os modelos de ensaio analisados.

Para os valores obtidos no topo da camada de balastro (TB), observa-se uma ligeira redução das deflexões quando é aplicada uma geogrelha, apresentando uma melhoria média entre os 0% (#GT120/45_1) e os 9% (#GT120/0).

Em relação aos valores obtidos no topo da camada de balastro imbricado (TBI), observa-se que quando é aplicada uma geogrelha, as deflexões aumentam ao nível desta camada. Quando a geogrelha é colocada na interface balastro/sub-balastro (#GT120/0), as deflexões aumentam, em média, 34% e,

quando a geogrelha é colocada a 45mm da interface, aumentam na ordem dos 90% (#GT120/45_1 e #GT120/45_2).

A Figura 5.11 apresenta os módulos de deformabilidade obtidos no topo do sub-balastro (TSB), no topo da camada de balastro (TB) e no topo da camada de balastro imbricado (TBI), determinados com base na Equação 5.1. Apresenta, ainda, o erro padrão, associado a cada valor obtido, calculado a partir do quociente entre o desvio padrão dos valores obtidos para as últimas cinco quedas da massa móvel e a raiz quadrada do número de quedas consideradas nos ensaios realizados.

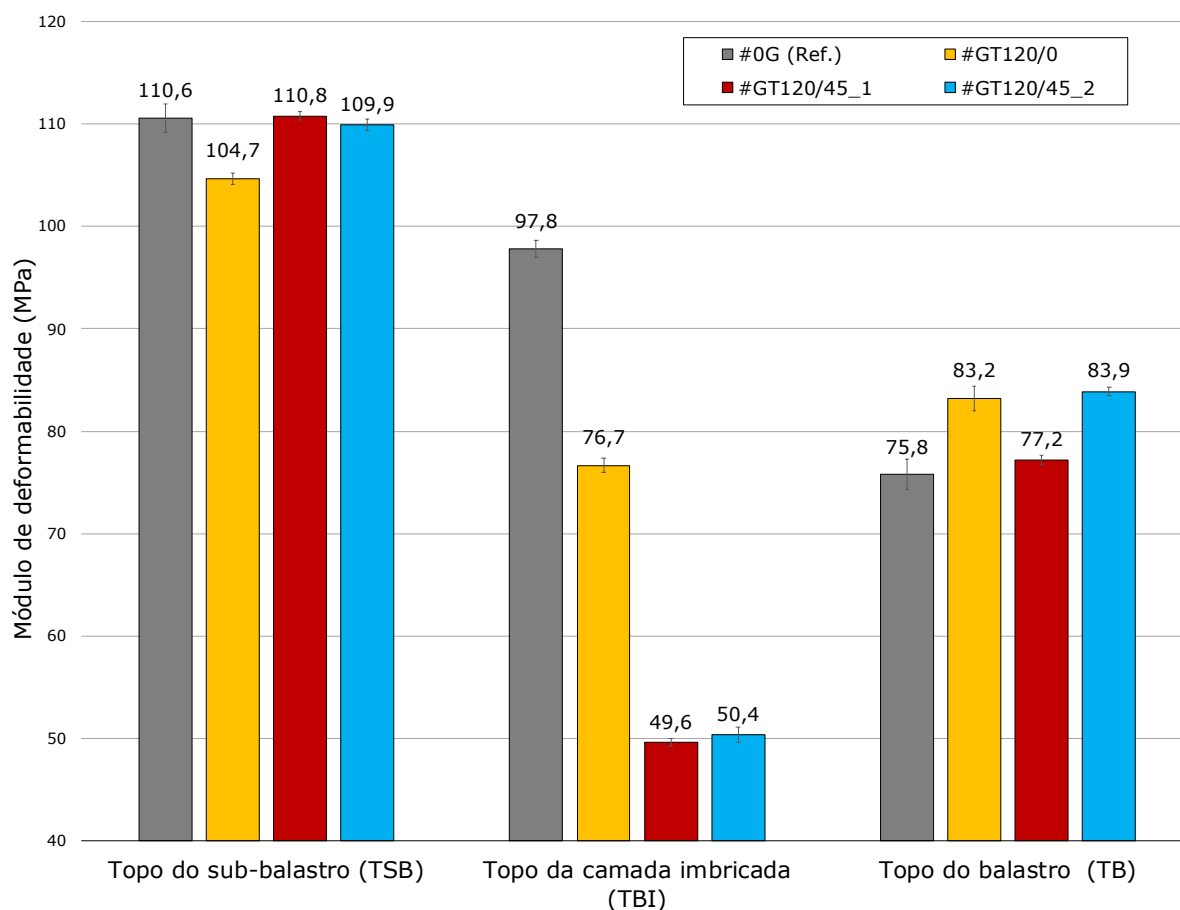


Figura 5.11 – Módulos de deformabilidade obtidos com o DIL.

Observa-se que os módulos de deformabilidade obtidos no topo do sub-balastro (TSB) estabilizaram nos 110MPa, aproximadamente. A ligeira variação no modelo #GT120/0 pode ser devida à instabilidade do equipamento sobre a placa de carga extra.

Relativamente às leituras efetuadas no topo da camada de balastro (TB), verifica-se que a variação do módulo de deformabilidade, face à ao modelo de referência, foi muito reduzida quando é aplicada uma geogrelha, verificando-se uma melhoria entre os 2% (#GT120/45_1) e os 10% (#GT120/0 e #GT120/45_2).

No que se refere ao topo da camada de balastro imbricada (TBI), constata-se que quando é colocada uma geogrelha, os módulos de deformabilidade diminuem significativamente. Quando a

geogrelha é colocada a 45mm da interface, varia de 97,8MPa (#0G) para, aproximadamente, 50MPa (#GT120/45_1 e #GT120/45_2).

Os módulos obtidos entre o topo da camada de sub-balastro (TSB) e o topo da camada de balastro imbricada (TBI), no modelo de referência, são semelhantes. Nos modelos que incluem uma geogrelha, verifica-se uma redução dos módulos de deformabilidade entre 27% (#GT120/0) e 55% (#GT120/45_1 e #GT120/45_2), entre estas duas zonas (TSB e TBI). Esta redução poderá ser devida ao efeito de desligamento de camadas na interface onde a geogrelha é aplicada.

Apesar dos valores dos módulos obtidos no topo da camada de balastro (TB) não evidenciarem a influência da aplicação de uma geogrelha, comparando os módulos obtidos no topo da camada de balastro imbricado (TBI) e no topo da camada de balastro (TB), verifica-se que este diminui no modelo sem geogrelha (de 97,8MPa para 75,8MPa), correspondendo a uma variação de 78%. Porém, nos modelos onde foi aplicada uma geogrelha, verificou-se um aumento do módulo entre estas duas zonas (TBI e TB), sugerindo que o efeito de imbricamento e de confinamento das partículas de balastro, ao nível da geogrelha, se propaga às partículas vizinhas, melhorando o comportamento global da camada, inclusive no topo desta. Esta interação entre o balastro e a geogrelha é mais evidente quando a geogrelha é colocada a 45mm da interface. Neste caso, a colocação da geogrelha entre duas camadas de balastro selecionado, a 45mm da interface balastro/ sub-balastro, contribuiu para um aumento de 166% do módulo de deformabilidade (#GT120/45_2).

O ANEXO 6 apresenta as deflexões, as forças obtidas com o DIL e o módulo de deformabilidade, calculado pela Equação 5.1, para cada ensaio realizado.

5.5. ADEQUABILIDADE DA UTILIZAÇÃO DO DIL

O Defletómetro de Impacto Ligeiro foi, inicialmente, concebido para ser utilizado em pavimentos rodoviários, onde a sua aplicação foi amplamente estudada. Contudo, no âmbito das vias férreas, o seu contributo carece ainda de alguma compreensão.

Verificou-se que o equipamento não permitiu avaliar, de forma clara, a influência da aplicação de geogrelhas na camada de balastro, questionando-se a sua adequabilidade.

A utilização da placa de carga extra permitiu que o geofone não entrasse em contacto com as partículas de balastro. Contudo, a estabilidade do equipamento sobre esta placa de carga é mais reduzida, podendo os valores obtidos com o DIL refletirem essa instabilidade. A garantia da horizontalidade da placa de carga, sobre o balastro, foi, também, uma dificuldade encontrada, na medida em que a superfície desta camada é bastante irregular.

Além disso, ao nível da geogrelha poderá existir desligamento de camadas, verificando-se um aumento das deflexões ao nível desta camada, contribuindo para que não se verifiquem ganhos significativos no módulo de deformabilidade. O termo camada desligada é um termo utilizado em infraestruturas de transporte. Gil (2015) refere que a ausência de ligação entre camadas contribui para um incremento das deformações e das deflexões na zona de desligamento.

Bold (2011), Hornicek e Brestovsky (2014) e Cafiso et al. (2017) utilizaram o DIL em vias férreas, de forma a analisarem a capacidade de carga da camada de balastro, questionando, também, a sua adequabilidade.

Bold (2011) verificou que os valores pouco uniformes dos módulos de deformabilidade foram devidos à medição do módulo de uma pequena área, correspondente à partícula de balastro na qual o geofone estava apoiado.

Também Hornicek e Brestovsky (2014) verificaram que a área de contacto entre a placa de carga e a superfície da camada de balastro corresponde, em média, a 1,66% da área da placa de carga. A área de contacto reduzida contribui para uma distribuição não uniforme do carregamento à superfície do balastro. A Figura 5.12 apresenta as zonas de contacto entre a placa de carga e a superfície da camada de balastro. Além disso, Hornicek e Brestovsky (2014) referem que a utilização de geogrelhas com a função de estabilização pode não refletir um aumento significativo da capacidade de carga da camada onde estão inseridas. Os resultados obtidos por estes autores mostraram que os módulos de deformabilidade obtidos nas secções com um geocompósito, constituído por uma geogrelha triaxial um geotêxtil, são inferiores àqueles obtidos nas secções de referência, sem geocompósito. Contudo, a zona de referência considerada não foi a mesma onde se aplicou o geocompósito.

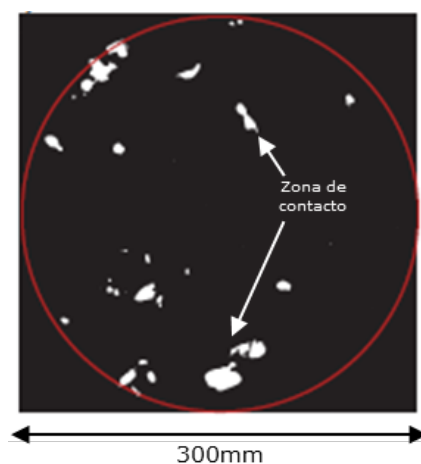


Figura 5.12 – Zona de contacto entre a placa de carga e a superfície da camada de balastro (Hornicek e Brestovsky, 2014).

Cafiso et al. (2017) utilizou, também, o DIL para medir o módulo de deformabilidade da camada de balastro e refere que existe uma grande variabilidade de valores obtidos nos diferentes trechos ensaiados, identificando como fraqueza/ ameaça, o carregamento insuficiente proporcionado pelo DIL para avaliar, de forma clara, a capacidade de carga desta camada, retornando valores pouco precisos.

5.6. RELAÇÃO ENTRE A DIMENSÃO DA ABERTURA DA GEOGRELHA E A DIMENSÃO DO BALASTRO (A/D)

De forma a analisar a relação A/D, considerou-se que a dimensão da abertura da malha da geogrelha (A) corresponde à dimensão da barra, 55mm, e a dimensão do balastro (D), à sua máxima dimensão ($D_{\text{máx}}$).

O Quadro 5.7 apresenta o cálculo da relação A/D e a percentagem de imbricamento em cada modelo de ensaio estudado.

Quadro 5.7 – Análise da relação A/D.

Modelo de ensaio	GT120/0	#GT120/0	#GT120/45 1	#GT120/45 2
$D_{\text{máx}}^{(1)}$ (mm)	63	45	45	45
$D_{50}^{(2)}$ (mm)	43	36,6	36,6	36,6
A ⁽³⁾ (mm)	55	55	55	55
A/ $D_{\text{máx}}$	0,87	1,22	1,22	1,22
A/ D_{50}	1,30	1,50	1,50	1,50
Imbricamento (%)	49	88	65	92

⁽¹⁾ máxima dimensão do balastro; ⁽²⁾ dimensão média do balastro;

⁽³⁾ dimensão da abertura da geogrelha (comprimento da barra)

Considerando as melhorias na percentagem de imbricamento verificadas, os resultados sugerem a utilização da relação A/ $D_{\text{máx}}$ próxima de 1,22, de forma a maximizar o imbricamento.

Vários autores sugerem relações A/D ótimas, tanto para geogrelhas biaxiais, como para geogrelhas triaxiais, conforme indicado no capítulo anterior.

O Quadro 5.8 apresenta os valores de A/D sugeridos pelos diferentes autores, recalculados, considerando A, a dimensão da barra da geogrelha, e D, a máxima dimensão do balastro.

Quadro 5.8 – Relação A/D.

Autor	Han et al. (2017)	Sweta e Hussaini (2018)	Presente trabalho
A ⁽¹⁾ (mm)	46	69	55
$D_{\text{máx}}$ (mm)	25	65	45
A/ $D_{\text{máx}}$	1,84	1,06	1,22

⁽¹⁾ dimensão da barra da geogrelha

A relação A/ $D_{\text{máx}}$ obtida neste trabalho, embora se enquadre nos valores relatados pelos autores na revisão bibliográfica, é mais representativa do contexto português, ou seja, tem em consideração as dimensões de balastro utilizado em Portugal e o caso de se aplicar uma geogrelha triaxial. Han et al. (2017) também referiu alguma variação dos valores obtidos para a relação A/D.

Como se observou no Capítulo 4, muitos autores utilizam a dimensão média do balastro (D_{50}) como a dimensão característica do balastro, de forma a calcularem a relação ótima entre a dimensão da abertura da geogrelha e a dimensão do agregado (A/ D_{50}). Contudo, a D_{50} apenas é uma dimensão representativa da amostra de balastro utilizada e não das partículas de balastro imbricadas nas aberturas da geogrelha. Han et al. (2017) refere que a utilização da D_{50} deve ser cautelosa pois o imbricamento

pode-se dar por partículas com uma dimensão, superior ou inferior, à da D_{50} , contribuindo, em pouco para o imbricamento.

Neste trabalho, utilizou-se o $D_{m\acute{a}x}$ em vez do D_{50} , dado que se considera ser uma opção mais prática para a aplicação em obra, podendo-se colocar um crivo com aberturas de 45mm, nos equipamentos de manutenção e reabilitação da via.

5.7. RECOMENDAÇÕES DE BOAS PRÁTICAS NA UTILIZAÇÃO DE GEOGRELHAS NA CAMADA DE BALASTRO

Para que ocorram melhorias no comportamento da camada de balastro com a aplicação de geogrelhas, é fundamental que exista imbricamento das partículas de balastro nas suas aberturas. Verifica-se que os aspetos mais relevantes para que ocorra imbricamento são a relação entre a dimensão da abertura da geogrelha e a dimensão máxima do balastro e a localização da geogrelha na camada de balastro.

Assim, tendo em consideração as geogrelhas utilizadas e o balastro utilizado em Portugal, de forma a maximizar o imbricamento e, consequentemente, a interação entre o balastro e a geogrelha, sugerem-se as seguintes recomendações de boas práticas construtivas na utilização de geogrelhas na camada de balastro:

- Quanto à relação entre a dimensão da abertura da malha da geogrelha e a dimensão do balastro selecionado para imbricamento ($A/D_{m\acute{a}x}$), considera-se que a relação $A/D_{m\acute{a}x}$ deve ser próxima de 1,22;
- Quanto à granulometria do balastro a utilizar, sugere-se a aplicação de uma camada de balastro selecionado em contacto com a geogrelha, com a dimensão máxima de 45mm, no caso do balastro especificado na norma europeia, ou de acordo com a relação do ponto anterior;
- Quanto à localização da geogrelha na camada de balastro, sugere-se que a mesma seja colocada acima da interface balastro/sub-balastro, a uma distância equivalente à dimensão máxima do balastro.

5.8. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo foi dedicado ao caso de estudo, com vista a definir uma relação entre a dimensão da abertura da malha da geogrelha e a dimensão do balastro (A/D) que maximize o imbricamento, a analisar a influência da geogrelha no comportamento da camada de balastro e a propor recomendações práticas para a aplicação de geogrelhas na camada de balastro. Considerou-se a influência da colocação de balastro com granulometria selecionada e a localização da geogrelha na camada de balastro.

Este capítulo apresentou os modelos físicos estudados, os materiais e os equipamentos utilizados, o procedimento de ensaio, os resultados obtidos e a sua discussão.

Verificou-se que o balastro está de acordo com os requisitos normativos, para os parâmetros analisados. Foi utilizada uma geogrelha triaxial com um hexágono elementar de 120mm, correspondendo a uma abertura de 55x55x55mm.

O trabalho experimental foi dividido em duas fases. A primeira fase teve como objetivo estudar a dimensão das partículas imbricadas nas aberturas da geogrelha, verificando-se que a sua máxima dimensão foi 50mm. De forma a aumentar a percentagem de imbricamento, utilizou-se, na segunda fase, uma camada de balastro selecionado em contacto com a geogrelha, com máxima dimensão de 45mm.

De uma forma geral, verificou-se que ocorreu um maior imbricamento quando foi colocada uma camada de balastro selecionado em contato com a geogrelha e que este aumenta, ainda mais, quando a geogrelha é, também, colocada a 45mm da interface balastro/ sub-balastro.

Os resultados obtidos sugerem que, por forma a maximizar o imbricamento, deve ser utilizada a relação $A/D_{\text{máx}}$ próxima 1,22, onde A é a dimensão da abertura da geogrelha e $D_{\text{máx}}$, a máxima dimensão do balastro.

Com base nos resultados obtidos com o Defletómetro de Impacto Ligeiro (DIL), verificou-se que a sua utilização no topo da camada de balastro não possibilitou avaliar, de forma clara, a influência da aplicação de uma geogrelha no módulo de deformabilidade desta camada. Contudo, verificou-se que ocorreu um aumento do módulo desde o topo da camada de balastro imbricado e o topo da camada de balastro, quando é aplicada uma geogrelha, sugerindo um efeito de imbricamento e de confinamento mais eficazes. O aumento mais significativo (166%) ocorreu quando a geogrelha é colocada entre duas camadas de balastro selecionado, a 45mm da interface balastro/sub-balastro.

Relativamente à análise do comportamento da camada de balastro com a aplicação de geogrelhas, verificou-se que o DIL não é o equipamento mais adequado para efetuar esta análise. Verificou-se que poderá ocorrer desligamento de camadas quando é colocada a geogrelha e que a área de contacto entre a placa de carga e a superfície do balastro é muito reduzida. Além disso, a utilização de geogrelhas com a função de estabilização pode não refletir um aumento significativo da capacidade de carga da camada onde estão inseridas.

6. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Esta dissertação abordou a aplicação de geogrelhas na camada de balastro. O trabalho desenvolvido teve como objetivos sintetizar o estado do conhecimento sobre o tema, a análise do imbricamento do balastro nas aberturas de uma geogrelha, por forma a definir uma relação entre a dimensão da abertura da malha da geogrelha e a dimensão do balastro (A/D) que maximize o imbricamento, considerando a influência da aplicação de uma camada de balastro selecionado em contacto com a geogrelha e a localização da geogrelha na camada de balastro. Este trabalho teve, também, como objetivo analisar a influência da geogrelha no comportamento da camada de balastro, através da medição de deflexões e determinação dos módulos de deformabilidade, com o Defletómetro de Impacto Ligeiro (DIL). Com base nos resultados obtidos, propõem-se recomendações de boas práticas que envolvam a aplicação de geogrelhas na camada de balastro.

O trabalho iniciou-se com a descrição da via férrea balastrada. Foram apresentados os principais elementos constituintes deste tipo de vias, dando maior relevância à camada de balastro. Foram, também, apresentadas as principais solicitações e ações de manutenção, as formas de degradação da camada de balastro e os documentos normativos aplicados ao balastro. Verificou-se que a camada de balastro é responsável, entre outras, pela estabilidade horizontal e vertical da via e por minimizar e uniformizar as tensões transmitidas às camadas subjacentes.

Foram abordados os geossintéticos, em termos da sua composição, classificação, funções e a sua aplicação em vias férreas. Sendo as geogrelhas o objeto de estudo do presente trabalho, foram apresentados as suas principais propriedades físicas e mecânicas e os seus mecanismos de funcionamento, nomeadamente o de imbricamento e de confinamento.

Efetuiu-se uma revisão bibliográfica sobre a colocação de geogrelhas na camada de balastro. Apresentaram-se as metodologias, os principais tópicos estudados pelos diferentes autores, sendo estes, o assentamento da camada de balastro, o deslocamento horizontal do balastro e a sua fragmentação, os esforços na interface balastro/sub-balastro e a relação entre a dimensão da abertura da geogrelha e a dimensão do balastro. Abordou-se, também, a interação entre o balastro e a geogrelha. De uma forma geral, verificou-se que a aplicação de geogrelhas triaxiais contribuíram para melhorias mais significativas do comportamento da camada de balastro, nomeadamente no assentamento desta camada. Os trabalhos analisados indicaram que o imbricamento é o parâmetro chave para que ocorram melhorias no comportamento da camada de balastro, com a aplicação de geogrelhas.

Relativamente ao caso de estudo, numa primeira fase, efetuou-se uma análise preliminar à dimensão das partículas de balastro imbricadas na geogrelha. Para o efeito, foi usado um modelo composto, da base para o topo, por uma camada de sub-balastro, uma geogrelha e uma camada de balastro. Verificou-se que a dimensão máxima das partículas imbricadas foi de 50mm e que a percentagem de imbricamento foi de 49%.

Por forma a maximizar o imbricamento, utilizou-se, na segunda fase, ensaios em modelos físicos, uma camada de balastro com granulometria selecionada, com máxima dimensão ($D_{\text{máx}}$) de 45mm. Esta camada foi colocada em contacto com a geogrelha, que foi colocada duas posições, nomeadamente, na interface balastro/sub-balastro e a 45 mm acima desta interface. Esta fase teve como objetivo analisar a influência da granulometria do balastro em contacto com a geogrelha e a localização da mesma.

Os resultados obtidos mostraram que:

- o imbricamento aumentou de 49% para 88%, quando foi aplicada uma camada de balastro selecionado sobre a geogrelha, localizada na interface balastro/sub-balastro;
- o imbricamento aumentou de 49% para 65%, quando a geogrelha foi aplicada sobre uma camada de balastro selecionado, a 45mm da interface balastro/ sub-balastro;
- o imbricamento aumentou de 65% para 92%, quando a geogrelha foi aplicada entre duas camadas de balastro selecionado, a 45mm da interface balastro/ sub-balastro.

Estes resultados evidenciam que há uma melhoria da percentagem de imbricamento quando é aplicada uma camada de balastro selecionado em contacto com a geogrelha. Evidenciam, também, que a melhoria é mais significativa quando a geogrelha é colocada entre duas camadas de balastro selecionado, a 45mm da interface balastro/ sub-balastro.

Com base nos resultados obtidos, definiu-se uma relação entre a dimensão da abertura da malha da geogrelha e a dimensão máxima do balastro ($A/D_{\text{máx}}$). Verificou-se que a relação $A/D_{\text{máx}}$ que maximiza o imbricamento foi de 1,22. Este valor, embora se enquadre nos valores apresentados na revisão bibliográfica, considera-se mais representativo para as dimensões do balastro utilizado em Portugal, no caso de se aplicar uma geogrelha triaxial.

Por fim, apresentaram-se algumas recomendações de boas práticas construtivas que envolvam a aplicação prática de geogrelhas na camada de balastro, nomeadamente que a relação $A/D_{\text{máx}}$ seja próxima de 1,22, e que a geogrelha se situe a uma distância da interface balastro/ sub-balastro equivalente à dimensão máxima do balastro.

Os resultados obtidos sugerem, ainda, que o Defletómetro de Impacto Ligeiro não foi o equipamento mais adequado para avaliar a influência da aplicação da geogrelha no comportamento da camada de balastro, nomeadamente, no seu módulo de deformabilidade. Verificou-se que ao nível da geogrelha poderá ocorrer desligamento de camadas e que a área de contacto entre a placa de carga e a superfície do balastro é bastante reduzida. Além disso, a geogrelha utilizada tem como função a de estabilização, pelo que pode não contribuir significativamente para um aumento dos módulos de deformabilidade obtidos.

Sugerem-se como trabalhos futuros, um estudo mais aprofundado do possível desligamento da geogrelha, nomeadamente através de modelos numéricos com elementos discretos, a validação da relação $A/D_{\text{máx}}$ proposta, considerando o seu contributo para melhorar o comportamento da camada de

balastro (por exemplo, o assentamento) em laboratório e em campo e analisar a influência da aplicação de outros tipos de geogrelha e de geogrelhas associadas a geotêxteis, no imbricamento.

REFERÊNCIAS

- Arulrajah, A.; Rahman, M.; Piratheepan, J.; Bo, M.; Asce, M.; Imteaz, M. (2014). Evaluation of Interface Shear Strength Properties of Geogrid-Reinforced Construction and Demolition Materials Using a Modified Large-Scale Direct Shear Testing Apparatus. *Journal Of Materials In Civil Engineering*, N.º 26 (974-982);
- Bold, R. (2011). Non-destructive evaluation of railway trackbed ballast. The University of Edinburgh;
- Borges, J. (1995). Aterros sobre Solos Moles Reforçados com Geossintéticos. Dissertação de Doutoramento em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto;
- Cafiso, S.; Capace, C.; D'Agostino, C.; Delfino, E.; Graziano, A. (2017). Introduction of new systems for evaluation of ballast bearing capacity. 10th International Conference on the Bearing Capacity of Rodas, Railways and Airfields – BCRRA 2017, (1993-2001);
- Carneiro, J. (2009). Durabilidade de materiais geossintéticos em estruturas de carácter ambiental – a importância da incorporação de aditivos químicos. Dissertação de Doutoramento em Engenharia do Ambiente, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto;
- Cook, J.; Belyaev, VS.; Ashpiz, ES. (2015). Comparative full-scale cyclic loading trials on track bed with and without geogrid stabilization. *Proceedings Railway Engineering*, Edimburgo, 30 de Junho a 1 de Julho de 2015 . ;
- Cook, J.; Hornicek, L. (2013). The performance of new generation geogrids within trackbed under cyclic railway loading. Conference: *Railway Engineering 2013*, Londres, 10 a 11 de Julho de 2013;
- Esmaili, M.; Zakeri, Jabbar; Babaei, M. (2017). Laboratory and field investigation of the effect of geogrid-reinforced ballast on railway track lateral resistance. *Geotextiles and Geomembranes*, N.º 45 (23-33);
- Esveld, C. (2001). *Modern Railway Track*. Second Edition, MRT-Productions;
- ETA12/0530. (2012). European Technical Approval, Tensar Manufacturing Ltd.;
- Fontul, S. (2016). Slides de apoio às aulas da disciplina de Infraestruturas Ferroviárias e Portuárias. Faculdade de Ciências e Tecnologia - UNL;
- Fortunato, E. (2005). Renovação de plataformas rodoviárias, Estudos relativos à capacidade de carga. Dissertação de Doutoramento em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia Universidade do Porto;
- Gil, C. (2015). Estudo da ligação entre camadas betuminosas de pavimentos flexíveis. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa;
- Gomes, L. (2001). Geotêxteis e suas aplicações. Seminário: A Indústria Têxtil nos Caminhos da Inovação. Universidade da Beira Interior, Covilhã, 19 a 20 de Outubro de 2001 (10-20);
- Grontmij - Carl Bro. (2008). User manual: PRIMA 100 LWD;
- Guerreiro, R. (2016). A arquitetura das estações de caminho-de-ferro em Portugal no início do século XX: quatro estudos de caso. Dissertação de Mestrado em Arquitetura, Faculdade de Arquitetura e Artes, Universidade Lusíada de Lisboa;
- Han, B; Ling, J.; Shu, X.; Gong, H.; Huang, B. (2017). Laboratory investigation of particle size effects on the shear behavior of aggregate-geogrid interface. *Construction and Building Materials*, N.º 158 (1015-1025);

- Hornicek, L.; Brestovsky, P.; Jasansky, P. (2017). Application of geocomposite placed beneath ballast bed to improve ballast quality and track stability. IOP Conference: Materials Science and Engineering, N.º 236;
- Hornicek, L.; Brestovsky, P. (2014). Using the lightweight falling deflectometer for monitoring trial railway sections with under-ballast geocomposites. 6th IET conference on Railway Condition Monitoring (RCM, 2014);
- Huang, H.; Tutumluer, E.; Domborw, W. (2009). Laboratory Characterization of Fouled Railroad Ballast Behavior. Journal of the Transportation Research Board, N.º 2117 (93-101); (doi: 10.3141/2117-12);
- Indraratna, B.; Hussaini, S.; Vinod, J. (2012). On the shear behavior of ballast-geosynthetic interfaces. Geotechnical Testing Journal, N.º 35 (305-312);
- Indraratna, B.; Hussaini, S.; Vinod, J. (2013a). The lateral displacement response of geogrid-reinforced ballast under cyclic loading. Geotextiles and geomembranes, N.º 39 (20-29);
- Indraratna, B.; Khabbaz, H.; Salim, W.; Christie, D. (2006). Geotechnical properties of ballast and the role of geosynthetics in rail track stabilization. Ground Improvement, N.º 3 (91-101);
- Indraratna, B.; Neville, T.; Rujikiatkamjorn, C.; Navoma, Nimbalkar, S.; Kaewunruen, S.; Christie, D.; Martin, M. (2014). Interchange – SMART: Supplementary Methods of Analysis for Railtracks;
- Indraratna, B.; Ngo, N.; Rujikiatkamjorn, C. (2013b). Deformation of coal fouled ballast stabilized with geogrid under cyclic load. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, N.º 139 (1275-1289);
- Indraratna, B.; Nimbalkar, S.; Christie, D.; Martin, M.; Neville, T.; Rujikiatkamjorn, C. (2012). State-of-the-art design aspects of ballasted rail tracks incorporating particle breakage, fouling, and the benefits of geosynthetic reinforcement. Conference On Railway Engineering, Brisbane;
- Indraratna, B.; Nimbalkar, S.; Christie, D.; Rujikiatkamjorn, C. (2010). Field assessment of the performance of a ballasted rail track with and without geosynthetics. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, N.º 136 (907-916);
- Indraratna, B.; Rujikiatkamjorn, C.; Vinod, J.; Khabbaz, H. (2009). A review of ballast characteristics, geosynthetics, confining pressures and native vegetation in rail track stabilization. Transport Engineering in Australia, N.º 12 (25-35);
- Kawalec, J. (2017). Stabilization of unbound aggregate by geogrids for transport infrastructure applications. 1º Seminário Geotecnia nos Transportes Melhoramento, Reforço e Reabilitação de Infraestruturas de Transporte;
- Koerner, R. (1998). Designing with geosynthetics. Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey;
- Kwan, C. (2006). Geogrid reinforcement of railway ballast. Dissertação de Doutorado, The University of Nottingham;
- Liu, S.; Huang, H.; Qiu, T.; Kwon, J. (2016). Effect of geogrid on railroad ballast studied by “smartrock”. Transportation Research Board Annual Meeting;
- LNEC (2009). Santos, A.; Antunes, M.; Fontul, S.; Fortunato, E.; Macedo, A.; Freire, A. Otimização de vias-férreas de alta velocidade mediante o uso de sub-balastro betuminoso. Relatório de progresso do projeto PDTC/ECM/7057/2006-2009;
- Lopes, J. (2010). Contributo para o estudo da utilização do Defletómetro de Impacto Ligeiro. Dissertação de Mestrado de Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico;

- McDowell, G.; Stickley, P. (2006). Performance of geogrid-reinforced ballast. *Ground Engineering*, N.º 39 (26-30);
- Moreira, A. (2014). Métodos de dimensionamento de vias férreas. Dissertação de Mestrado de Engenharia Civil, Universidade do Minho;
- Paixão, A. (2014). Transition zones in railway tracks: An experimental and numerical study on the structural behavior. Dissertação de Doutoramento, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto;
- Petriaev, A. (2017). Stress response analyses of ballasted rail tracks, reinforced by geosynthetics. *Procedia Engineering*, N.º 189 (660-665);
- Petriaev, A.; Konon, A. (2017). Performance of ballast layer reinforced with geosynthetics in terms of heavy axle load operation. *Procedia Engineering*, N.º 189 (654-659);
- Pimentel, K.C.A. (2007). Estradas não pavimentadas e ferrovias reforçadas com geossintéticos. Dissertação de Doutoramento, Universidade de Brasília;
- Pinto, A. (2005). Aplicação de Geossintéticos em Linhas-Férreas Estudo Laboratorial dos Fenómenos de Danificação Durante a Instalação e Abrasão nos Materiais. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto;
- Rodrigues, D.; Capitão, S.; Fontul, S. (2013). Casos práticos de manutenção de vias férreas em Portugal. *International Conference on Engineering 2013*, University of Beira Interior;
- Selig, E.; Waters, J. (1994). "Track Geotechnology and Substructure Management", Thomas Telford, London;
- Silva, T. (2012). Inspeção e Reabilitação de Infraestruturas Ferroviárias, Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa;
- Sweta, K.; Hussaini, S. (2018). Effect of shearing rate on the behaviour of geogrid-reinforced railroad ballast under direct shear conditions. *Geotextiles and Geomembranes*, N.º 46 (251-256);
- Tavares, P. (2009). Reforço de subestruturas de vias férreas com geossintéticos. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto;
- Tutumluer, E.; Dombrow, W.; Huang, H.; 2008. Field assessment of the performance of a ballasted rail track with and without geosynthetics. *AREMA 2008 Annual Conference & Exposition*;
- Vale, C. (2010). Influência da qualidade dos sistemas ferroviários no comportamento dinâmico e no planeamento da manutenção preventiva de vias de alta velocidade. Dissertação de Doutoramento em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia Universidade do Porto.

Sítios da Internet

- <https://www.cp.pt/institucional/pt/cultura-ferroviaria/historia-cp/cronologia> (acedido em 18-10-2017);
- <http://meios-de-transporte.info/evolucao-dos-transportes.html> (acedido em 18-10-2017);
- <http://www.fib-international.org/precast-concrete-railway-track-systems> (acedido em 20-10-2018);
- <https://docslide.us/engineering/designing-with-geosynthetics-by-koerner-5th-edition-2005.html> (acedido em 25-10-2017);

[Ecosalix, 2017]

<http://ecosalix.pt/produto/geocelulas/> (acedido em 30-10-2017);

[IGS – Portugal, 2017a]
<http://www.spgeotecnia.pt/upload/docs/Documentos%20IGS/FOLHETOS/Classificacao%20dos%20Geossinteticos.pdf> (acedido em 24-10-2017);

[IGS – Portugal, 2017b]
<http://www.spgeotecnia.pt/upload/docs/Documentos%20IGS/FOLHETOS/Funcoes%20dos%20Geossinteticos.pdf> (acedido em 24-10-2017);

[IGS – Portugal, 2017c]
<http://www.spgeotecnia.pt/upload/docs/Documentos%20IGS/FOLHETOS/Geossinteticos%20em%20Vias%20Ferreas.pdf> (acedido em 21-10-2017);

[Maccaferri, 2017]. Filtração, separação e proteção: necessidades e soluções. Maccaferri do Brasil 2017.
<https://www.maccaferri.com/br/download/brochure-br-filtracao-separacao-e-protecao-pt-feb21/?wpdmdl=7503>
(acedido em 6-06-2018);

[PETI3+, 2014]. Plano Estratégico dos Transportes e Infraestruturas 2014-2020, 2014, Gabinete do Secretário de Estado das Infraestruturas, Transportes e Comunicações, Ministério da Economia.
http://www.infraestruturasdeportugal.pt/sites/default/files/files/files/PETI%203%2B_1.pdf
(acedido em 3-03-2018);

[TEGAPE, 2017]
http://www.tegape.com.br/atuacao_interna/id/78/geossinteticos--georrede-nucleo-drenante
(acedido em 30-10-2017)

[Tensar – Railways, 2012]
<http://www.tensar.pt/FileDownload.ashx?id=%7bA2DEEDE8-FD43-440F-813C-57D7D8C9A324%7d> (acedido em 25-10-2017).

Documentos Normativos

ASTM E2583-07 (2015) – Standard Test Method for Measuring Deflections with a Light Weight Deflectometer (LWD);

EN ISO 10318-2: 2015 – Geosynthetics – Part 2: Symbols and pictograms;

EN ISO 13431: 1999 – Geotextiles and geotextile-related products - Determination of tensile creep and creep rupture behavior;

EOTA TR041: 2012 – Non-reinforcing hexagonal geogrid for the stabilization of unbound granular layers by way of interlock with the aggregate – Technical Report;

ISO 10318-1: 2015 – Geosynthetics – Part 1: Terms and definitions;

IT.GEO.001: 2004 – Fornecimento de balastro e gravilha. Rede Ferroviária Nacional;

IT.GEO.006: 2007 – Características técnicas do sub-balastro. Rede Ferroviária Nacional;

IT.VIA.018: 2009 – Tolerâncias dos parâmetros geométricos da via. Rede Ferroviária Nacional;

- NP EN 1097-2: 2011 – Ensaios das propriedades mecânicas e físicas dos agregados. Parte 1: Métodos para a determinação da resistência à fragmentação;
- NP EN 13450: 2005 – Agregados para balastro de via-férrea;
- NP EN 13738: 2007 – Geotêxteis e produtos relacionados. Determinação da resistência ao arranque no solo;
- NP EN 29073-3: 1993 – Têxteis. Métodos de ensaio para tecidos não-tecidos. Parte 3: Determinação da resistência à tracção e do alongamento;
- NP EN 933-1: 2014 – Ensaios das propriedades geométricas. Parte 1: Análise granulométrica. Método da peneiração;
- NP EN 933-3: 2014 – Ensaios das propriedades geométricas. Parte 3: Determinação da forma das partículas. Índice de achatamento;
- NP EN 933-4: 2014 – Ensaios das propriedades geométricas. Parte 4: Determinação da forma das partículas. Índice de forma;
- NP EN ISO 10319: 2005 – Geotêxteis. Ensaio de tração em tiras largas;
- NP EN ISO 12957-1: 2007 – Geossintéticos. Determinação das características de atrito. Parte 1: Ensaio de corte directo.
- NP EN ISO 13934-1: 2001 – Têxteis. Propriedades de tracção dos tecidos. Parte 1: Determinação da força máxima e do alongamento à força máxima pelo método da tira;
- NP EN ISO 9863-1: 2006 – Geossintéticos. Determinação da espessura a pressões especificadas - Parte 1: Camadas simples;
- NP EN ISO 9864: 2006 – Geossintéticos - Determinação da massa por unidade de área de geotêxteis e produtos relacionados.

ANEXOS

ANEXO 1 – CONSIDERAÇÕES GERAIS SOBRE OS TÓPICOS ANALISADOS NO ESTADO DO CONHECIMENTO

Assentamento da camada de balastro

O assentamento da camada de balastro provoca alterações ao nível da cota do carril, alterando o nivelamento longitudinal e a distribuição dos esforços, podendo condicionar as condições de conforto e segurança. O assentamento da camada de balastro pode ser dividido em duas fases: o assentamento inicial, rápido devido ao rearranjo das partículas do balastro, e à sua compactação, e o assentamento devido à fragmentação das partículas, mais lento, durante fase de exploração da via (Indraratna et al., 2006).

Conforme se pode observar na Figura A 1, as principais causas do assentamento da camada de balastro são o movimento das partículas de balastro e a sua fragmentação.

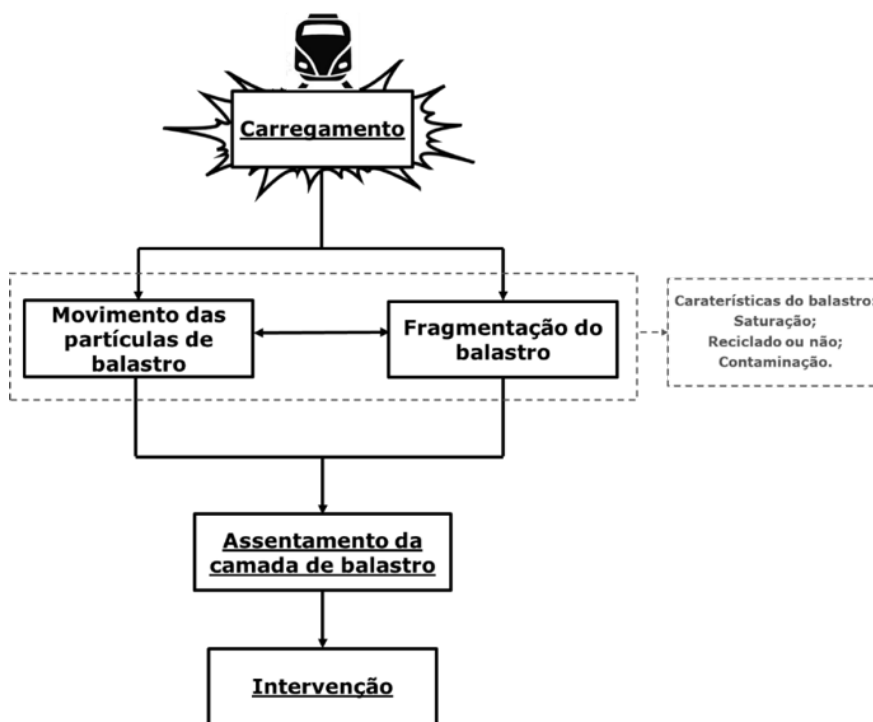


Figura A 1 – Assentamento da camada de balastro.

Vários autores sugeriram expressões para o cálculo do assentamento da camada de balastro:

- Tendo em conta o índice de contaminação de vazios (VCI), Indraratna et al. (2013b) sugere que o assentamento pode ser calculado pela Equação A 1. Para o cálculo do VCI, Indraratna et al. (2013b) utilizou a Equação A 2.

$$S = a + \frac{b}{1 - VCI} \log_{10}(N) \quad \text{Equação A 1}$$

Onde:

S – Assentamento (mm);

a e b – constantes empíricas que dependem do VCI (Quadro A 1)

Quadro A 1 – Constantes a e b para o cálculo do assentamento.

VCI (%)	Com geogrelha		Sem geogrelha	
	a	b	a	b
0	3,456	2,712	1,612	1,961
10	3,65	2,62	1,64	2,198
20	3,701	2,601	1,806	2,401
40	4,503	2,075	3,05	1,899
70	4,55	1,099	3,85	1,055

VCI – Índice de contaminação de vazios ($0 \leq VCI < 1$);

N – Número de ciclos de carregamento.

$$VCI = \frac{1 + e_f}{e_b} \times \frac{G_{sb}}{G_{sf}} \times \frac{M_f}{M_b} \times 100 \quad \text{Equação A 2}$$

Onde:

VCI – Índice de contaminação de vazios (%);

e_f – Índice de vazios do material contaminante;

e_b – Índice de vazios do balastro;

G_{sb} – Densidade do balastro;

G_{sf} – Densidade do material contaminante;

M_f – Massa do material contaminante;

M_b – Massa de balastro.

- Tendo em conta o tipo de geossintético (geotêxtil ou geocompósito) utilizado como reforço/ estabilização da camada de balastro, Cook et al. (2013) definiu 6 expressões que permitem calcular o assentamento no topo do carril e ao nível do geossintético (Equações A 3, A 4, A 5, A 6, A 7 e A 8):

i) Assentamento no topo do carril

Com a colocação de um geocompósito constituído por um geotêxtil e uma geogrelha triaxial:

$$S_{Carril} = 0,6452 \ln(N) + 0,5222 \quad \text{Equação A 3}$$

Com a colocação de um geocompósito constituído por um geotêxtil e uma geogrelha biaxial:

$$S_{Carril} = 0,764 \ln(N) + 0,836 \quad \text{Equação A 4}$$

Com a colocação de um geotêxtil:

$$S_{Carril} = 1,0763 \ln(N) + 0,4479 \quad \text{Equação A 5}$$

Onde:

S_{Carril} – Assentamento do topo do carril (mm);

N – Número de ciclos de carregamento.

ii) Assentamento ao nível do geossintético

Com a colocação de um geocompósito constituído por um geotêxtil e uma geogrelha triaxial:

$$S_{Geossintético} = 0,049 \ln(N) + 1,3921 \quad \text{Equação A 6}$$

Com a colocação de um geocompósito constituído por um geotêxtil e uma geogrelha biaxial:

$$S_{Geossintético} = 0,0488 \ln(N) + 1,6564 \quad \text{Equação A 7}$$

Com a colocação de um geotêxtil:

$$S_{Geossintético} = 0,01778 \ln(N) + 1,225 \quad \text{Equação A 8}$$

Onde:

$S_{Geossintético}$ – Assentamento ao nível do geossintético (mm);

N – Número de ciclos de carregamento.

- Tendo em consideração a fragmentação do balastro, Indraratna et al. (2013a) sugere a Equação A 9.

$$S = 2,43BBI - 1,74 \quad \text{Equação A 9}$$

Onde:

S – Assentamento (mm);

BBI – Ballast Breakage Index (%)

Deslocamento horizontal do balastro

O deslocamento horizontal do balastro (Figura A 2) contribui para o assentamento da camada de balastro e é tanto, maior quanto maior forem as velocidades de circulação. Este deslocamento é agravado quando existem defeitos quer no carril, quer nos rodados (Indraratna et al., 2010).

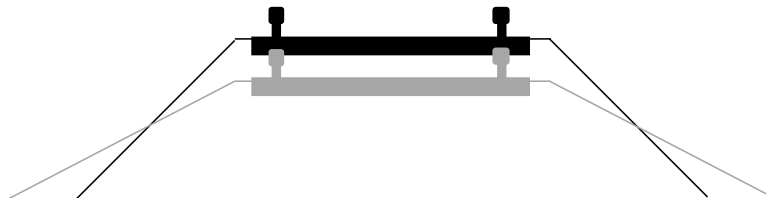


Figura A 2 – Deslocamento horizontal do balastro.

Esforços na interface balastro/ sub-balastro

A função das diferentes camadas da estrutura da via férrea é transmitir os esforços desde o carril até à fundação. Uma boa distribuição dos esforços reduz a probabilidade de surgirem zonas com deformações e defeitos que possam afetar a estabilidade da via.

Deformabilidade vertical da via

A rigidez vertical da via é um parâmetro importante para um comportamento eficiente da via. A rigidez da via reflete a resistência a deformações verticais durante o seu carregamento. Este parâmetro pode ser definido como o quociente entre a carga aplicada pelo rodado e o máximo deslocamento vertical da via, medido no topo do carril, na zona onde é aplicada a carga. Usualmente, a rigidez da via é expressa em kN/mm.

Uma via com uma rigidez vertical reduzida fica sujeita a grandes deformações verticais, condicionando o movimento dos rodados sobre os carris. Pelo contrário, uma via com uma rigidez vertical elevada proporciona uma maior interação dinâmica entre os rodados e os carris, potenciando a magnitude dos carregamentos. Uma maior interação entre as travessas e o balastro contribui para sua degradação mais acelerada e maiores carregamentos transmitidos às camadas seguintes. Ao longo do desenvolvimento da via férrea, a sua rigidez pode variar, por exemplo em zonas de transição entre aterros e obras de arte e devido a alterações das características das camadas da subestrutura e da superestrutura. (Paixão, 2014).

Fragmentação do balastro

A fragmentação das partículas de balastro contribui para o assentamento diferencial da camada de balastro e pode resultar da movimentação das partículas (Indraratna et al, 2006). Além disso, a presença de fragmentos e de finos de balastro nos vazios da camada contribui para a diminuição da permeabilidade da via, comprometendo a sua função de drenagem (Indraratna et al., 2006). As principais causas da degradação do balastro derivam dos carregamentos cíclicos excessivos, das vibrações transmitidas pela onda de avanço dos rodados e pelo impacto das travessas quando ocorrem assentamentos diferenciais. A degradação do balastro (Figura A 3), além da microfissuração, de acordo com Indraratna et al. (2006) pode ocorrer de 3 formas:

- Fragmentação do balastro em partes iguais;
- Fragmentação das zonas mais angulosas do balastro, que contribui para um assentamento inicial da via;
- Fragmentação de pequenas partículas do balastro, que contribui para a contaminação do balastro.

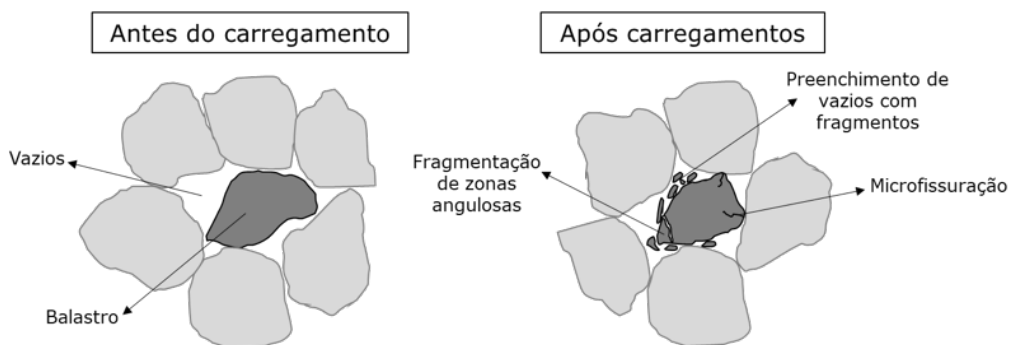


Figura A 3 – Fragmentação do balastro (adaptado de Interchange 2014).

Indraratna et al. (2006) verificou que o balastro reciclado tem uma fragmentação 97% superior que a do balastro novo, devido à existência de microfissuras.

De forma a analisar a eficácia da geogrelha na mitigação da fragmentação das partículas de balastro, Indraratna et al. (2013a) utilizou o cálculo do *Ballast Breakage Index* (BBI). O cálculo do BBI consiste em arbitrar uma fronteira máxima de fragmentação do balastro, que é obtida pela reta entre a dimensão do menor peneiro e a dimensão onde passa 95% da massa (D_{95}) e o cálculo de áreas entre curvas granulométricas (Indraratna et al., 2009). A expressão e o método de cálculo são os que se apresentam na Equação A 10 e na Figura A 4.

$$BBI = \frac{A}{A + B} \quad \text{Equação 4.10}$$

Onde:

BBI – Ballast Breakage Index (%);

A – Área entre a curva de distribuição granulométrica inicial e final;

B – Área entre a fronteira de fragmentação máxima arbitrada e a curva de distribuição granulométrica final;

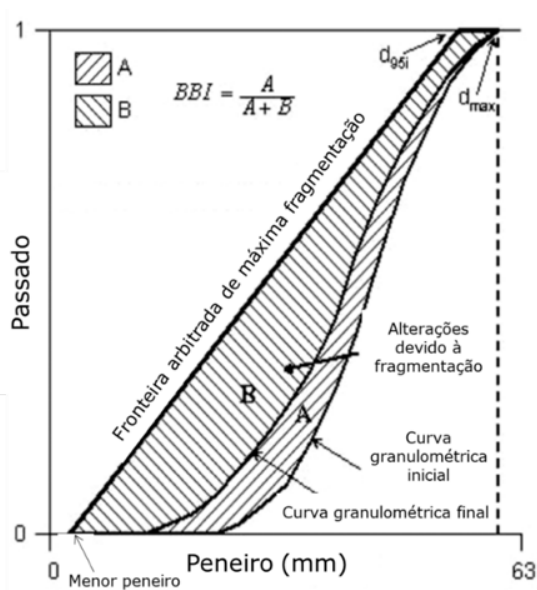


Figura A 4 – Cálculo do BBI (adaptado de Indraratna et al., 2009).

ANEXO 2 – CARATERIZAÇÃO DO BALASTRO

Análise granulométrica

A análise granulométrica ao balastro foi feita tendo em consideração a norma NP EN 933-1.

De forma resumida, a análise granulométrica passou por recolher o balastro da zona de armazenamento e à sua secagem em estufa e, posteriormente, à sua pesagem. Procedeu-se à sua lavagem, secagem e pesagem, de forma a obter a massa de finos removida durante a lavagem.

De seguida, procedeu-se à peneiração manual da amostra de balastro, utilizando os peneiros com aberturas de 63mm, de 50mm, de 40mm, de 31,5mm e de 22,4mm para as partículas mais grosseiras. Para as partículas mais pequenas, utilizaram-se peneiros com aberturas de 8mm, de 4mm, de 2mm, de 1mm, de 0,5mm, de 0,25mm, de 0,125mm e de 0,063mm.

No final da peneiração, registou-se a massa de balastro retida em cada peneiro e traçou-se a curva granulométrica correspondente.

Índice de forma

O índice de forma das partículas é determinado tendo em conta a relação entre comprimento das partículas e a sua espessura. O cálculo deste índice teve por base a norma NP EN 933-4.

Entende-se por comprimento de uma partícula (L) a maior distância entre dois planos paralelos tangenciais à superfície da partícula e por espessura da partícula (E) a menor distância entre dois planos paralelos tangenciais à superfície da partícula. Foi utilizado um paquímetro.

O índice de forma é calculado com a massa das partículas com uma razão $L/E > 3$ (consideradas não cúbicas), expressa em percentagem da massa total seca das partículas ensaiadas (Figura A 5).

A amostra apresenta um índice de forma igual a 9,62% (10%), satisfazendo o requerido no documento técnico IT.GEO.001 (2004).



Figura A 5 – Verificação da condição $L/3$.

Índice de achatamento

O índice de achatamento é um outro parâmetro que define a forma das partículas da amostra. Para o cálculo do índice de achatamento teve-se em consideração a norma NP EN 933-3.

Separou-se a amostra em várias frações granulométricas e utilizaram-se peneiros de barras (Figura A 6).

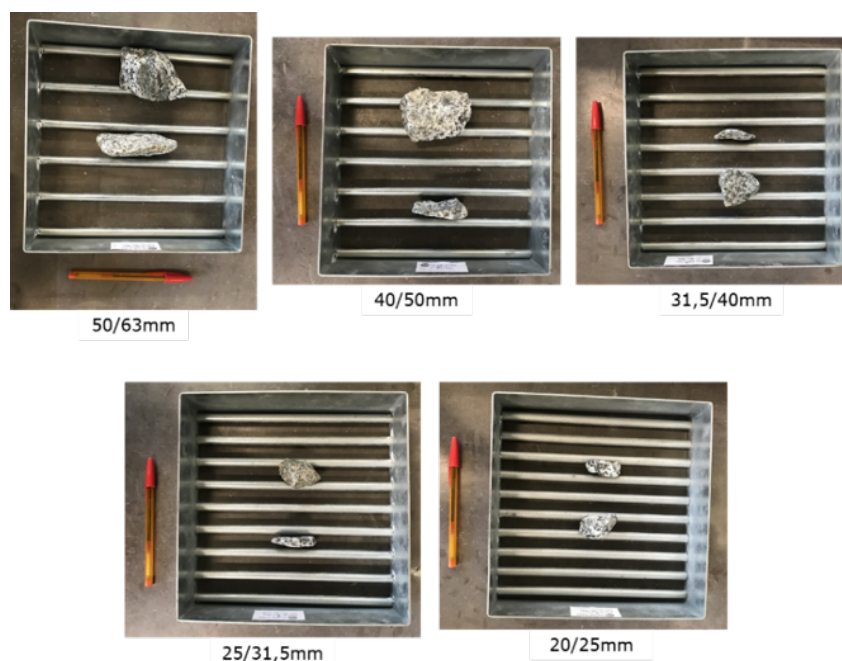


Figura A 6 – Peneiros de barras.

O índice de achatamento é um valor percentual calculado através do quociente entre a massa total das partículas que atravessam a ranhura dos peneiros de barras (massa rejeitada) e a massa total da amostra ensaiada.

A amostra de balastro analisada apresenta um índice de achatamento igual a 8,81% (9%), satisfazendo o requerido no documento técnico IT.GEO.001 (2004).

Comprimento

Para se avaliar o comprimento das partículas da amostra, utilizou-se uma bitola metálica com um perfil em U, com uma dimensão de 100mm (Figura A 7), tendo sido utilizado um paquímetro.

Considerou-se que o comprimento da partícula (L) é a dimensão máxima de uma partícula, definida pela distância maior entre dois planos paralelos tangenciais à superfície da partícula (IT.GEO.001, 2004). Todos os elementos que apresentaram um comprimento superior ao da bitola foram pesados, tendo sido o comprimento calculado a partir do quociente entre a massa total dos elementos com comprimento superior ao da bitola e a massa total da amostra.



Figura A 7 – Medição do comprimento da partícula.

A amostra de balastro analisada apresenta um comprimento igual a 0,84% (1%), satisfazendo os requisitos normativos.

Resistência à fragmentação

O ensaio de resistência à fragmentação tem por base a norma NP EN 1097-2, contudo, para o balastro, o procedimento deve ser ajustado tendo em conta o Anexo C da norma NP EN 13450 (Quadro A 2).

Quadro A 2 – Alterações introduzidas pelo Anexo C da NP EN 13450

	NP EN 1097-2	Anexo C da norma NP EN 13450
Frações	10/11,2	31,5/40
granulométricas (mm)	11,2/14	40/50
Massa de cada fração granulométrica (g)	(2500±25)g	(5000±50)g
Abrasão	11 esferas de aço com uma massa total entre 4690g e 4860g	12 esferas de aço com uma massa total de (5210±90)g
Rotações	500	1000
Expressão de cálculo (onde m é a massa retida no peneiro 1,6mm de abertura)	$LA = \frac{5000 - m}{50}$	$LA_{RB} = \frac{10000 - m}{100}$

A Figura A 8 apresenta a sequência fotográfica do ensaio de Los Angeles, à qual se sucedeu a peneiração, para determinar a massa retida no peneiro de 1,6mm de abertura.

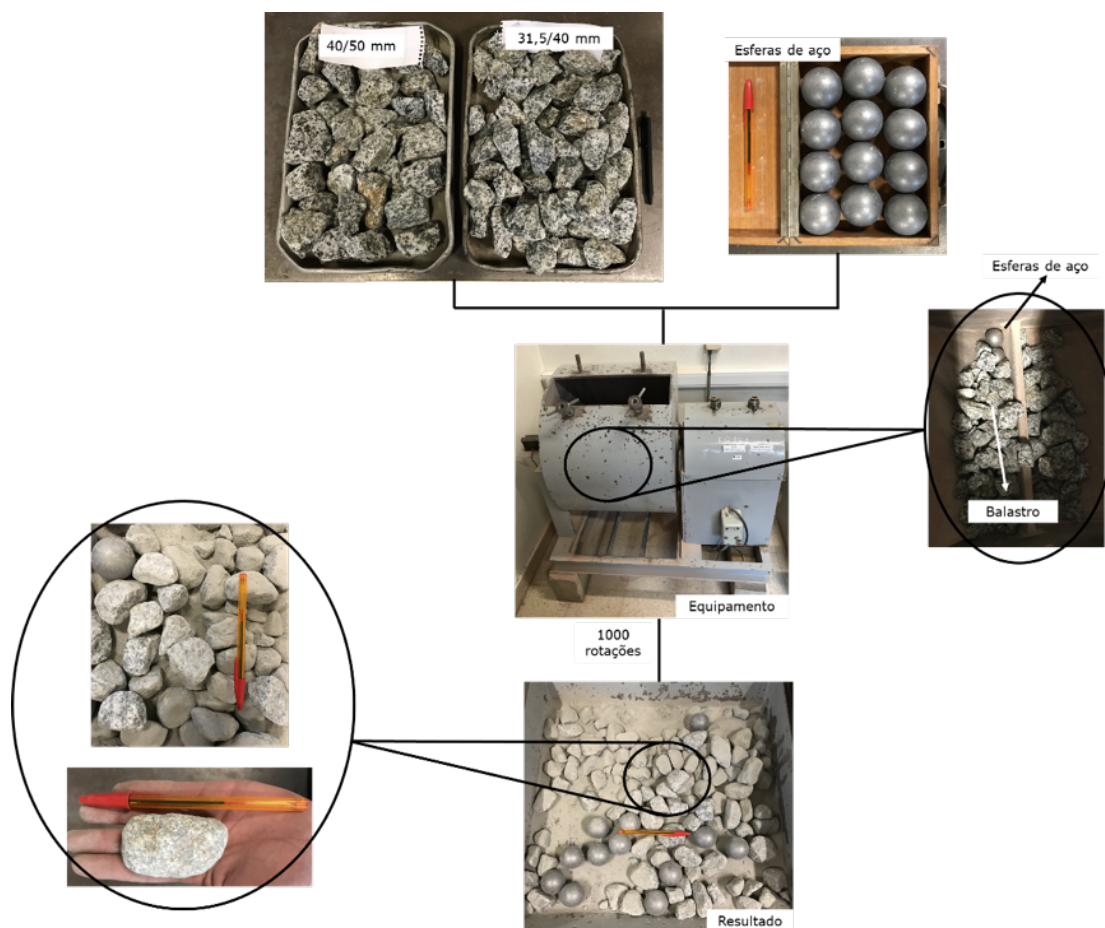


Figura A 8 – Sequência do ensaio de resistência à fragmentação.

O coeficiente de Los Angeles da amostra ensaiada é de 10,78% (11%), correspondendo ao balastro do tipo I, de acordo o documento técnico IT.GEO.001 (2004).

ANEXO 3 – DEFLETÓMETRO DE IMPACTO LIGEIRO

O Defletómetro de Impacto Ligeiro (DIL), ou Defletómetro de Impacto Portátil (DIP), é um equipamento que permite realizar ensaios de carga com placa, onde a força de impacto é gerada pela queda de uma massa sobre um sistema de amortecedores. O impulso é transmitido às camadas subjacentes através de uma placa de carga, resultando, daí, tensões e deformações da superfície da camada em ensaio. Trata-se de um ensaio não destrutivo (Fortunato, 2005).

Deste ensaio obtêm-se informações acerca da deflexão da superfície de ensaio, da força de impacto, da pressão exercida sob a placa de carga e, ainda, acerca do módulo de deformabilidade e da capacidade de carga das camadas (Fortunato, 2005). O ensaio com este equipamento pode, ainda, proporcionar alguma compactação das camadas.

O PRIMA 100 LWD é constituído por (Figura A 9) (User Manual: PRIMA 100 LWD):

- Unidade principal de célula de carga [1];
- Placa de carga [2];
- Membrana de borracha;
- Amortecedores [3];
- Bateria e carregador;
- Sensor de deflexão (geofone) (Figura A 10);
- Manípulo gatilho [4];
- Massa móvel [5];
- Haste guia da queda do peso [6];
- Módulo *Wireless* (ligação *Bluetooth*) [7];
- *Software* de instalação do programa.

As especificações técnicas do equipamento são as que se encontram no Quadro A 3.

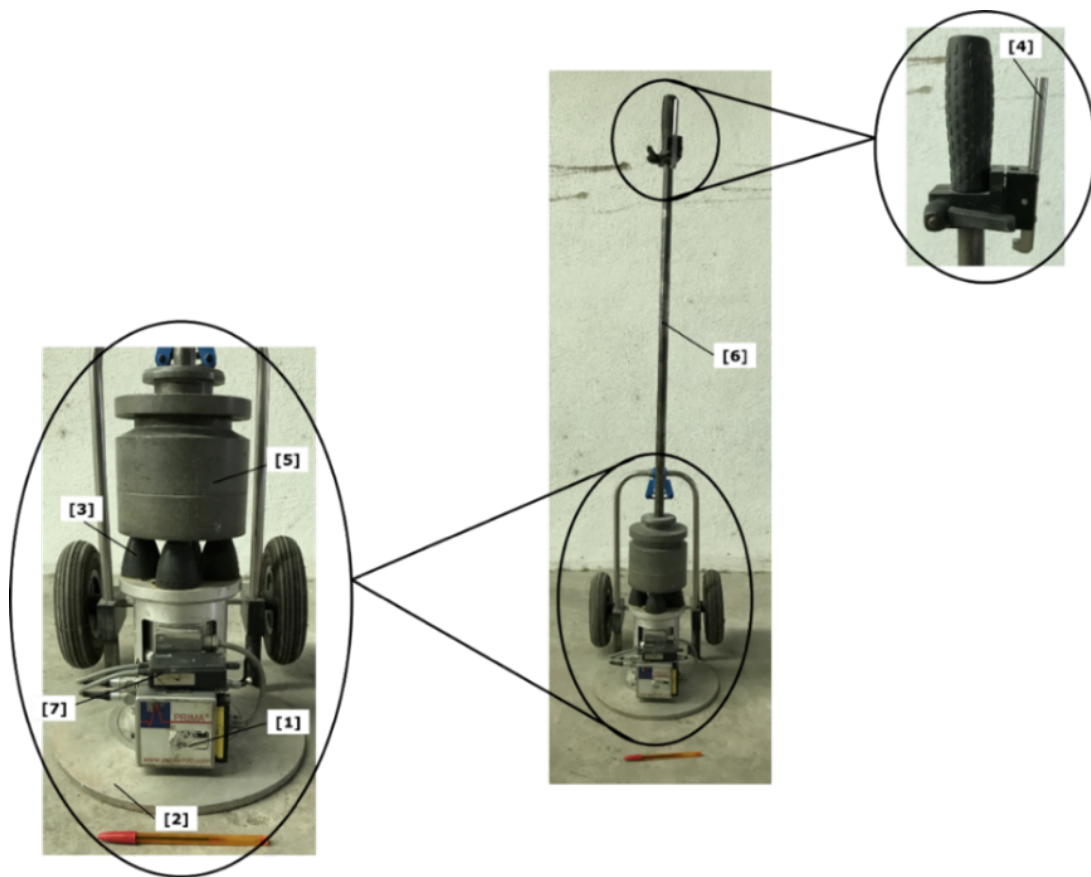


Figura A 9 – Principais componentes do DIL.

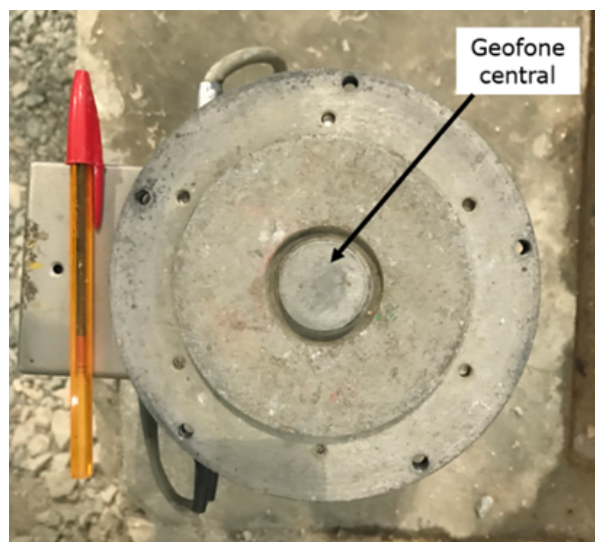


Figura A 10 – Geofone central.

Quadro A 3 – Especificações técnicas do PRIMA 100 LWD (Manual do utilizador: PRIMA 100 LWD).

DIMENSÕES	
Altura	1,40m
Peso standard	< 20kg
Massa móvel standard	10kg
Massa móvel adicional	5 e 10kg
Massa móvel máxima	20kg
Altura de queda máxima	85cm
CARACTERÍSTICAS DA CARGA	
Diâmetro da placa de carga	100 – 200 – 300mm
Gama de cargas	1 – 20kN
Duração do impulso	15 – 30ms
Forma do impulso	Semi-sinusoidal
Tempo de ascensão	8 – 15ms
CÉLULA DE CARGA	
Exatidão	1%±0,1kN
Resolução	0,1kN (1kPa)
Gama de frequências	0 – 400Hz
SENSOR DE DEFLEXÃO	
Tipo	Geofone
Número	1 a 3
Gama de medição	2200µm
Gama de frequências	0,2 – 300Hz
Exatidão	±2%
Resolução	1 µm

O procedimento resumido e adotado na utilização deste equipamento foi o seguinte:

- Verificar a conexão Bluetooth entre o DIL e o PDA;
- Colocar a placa de carga no local do ensaio;
- Posicionar o equipamento com o geofone central (acoplado na unidade principal) no local onde se irá realizar o ensaio;
- Levantar a massa móvel até à altura pretendida e prendê-lo no manípulo gatilho;
- Pressionar o manípulo gatilho e deixar cair a massa móvel livremente.

ANEXO 4 – PORMENORES DO PROCEDIMENTO DE ENSAIO

A Figura A 11, a Figura A 12, a Figura A 13, a Figura A 14 e a Figura A 15 apresentam alguns pormenores do procedimento de ensaio.

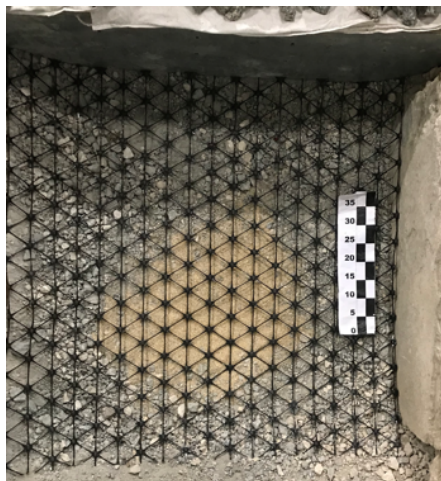


Figura A 11 – Colocação da geogrelha na interface.

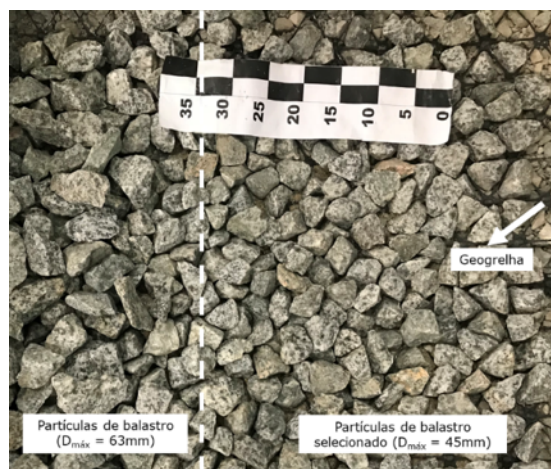


Figura A 12 – Colocação da geogrelha na interface e das camadas de balastro com diferentes granulometrias.

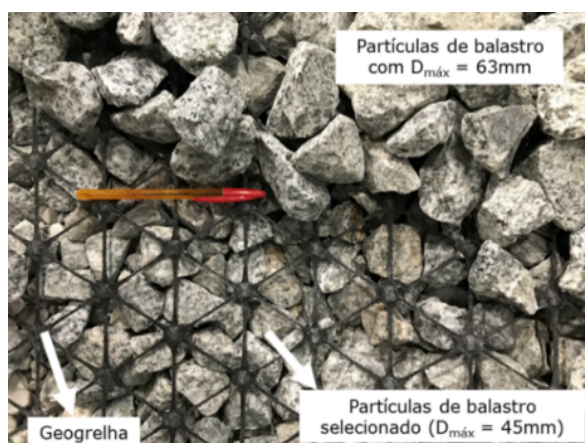


Figura A 13 – Camadas de balastro selecionado no modelo #GT120/45_1.

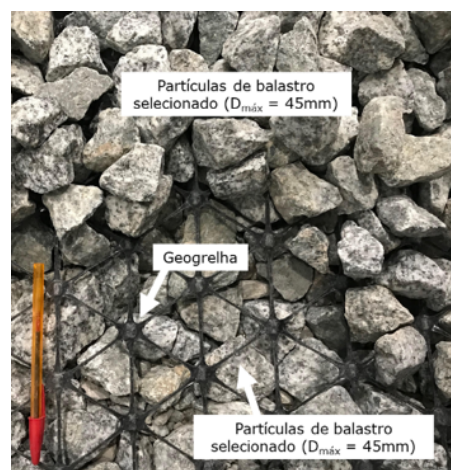


Figura A 14 – Camada de balastro selecionado no modelo #GT120/45_2.



Figura A 15 – Ensaio com o DIL no topo da camada de balastro.

ANEXO 5 – PARTÍCULAS IMBRICADAS NOS MODELOS DE ENSAIO

A Figura A 16, a Figura A 17, a Figura A 18 e a Figura A 19 apresentam exemplos de partículas imbricadas nas aberturas da geogrelha, nos diferentes modelos físicos estudados.



Figura A 16 – Partículas imbricadas no modelo GT120/0.



Figura A 17 – Partículas imbricadas no modelo #GT120/0.



Figura A 18 – Partículas imbricadas no modelo #GT120/45_1.



Figura A 19 – Partículas imbricadas no modelo #GT120/45_2.

ANEXO 6 – VALORES OBTIDOS COM O DIL

O Quadro A 4 apresenta os valores obtidos com o DIL, no topo da camada do sub-balastro, no topo da camada de balastro e no topo da camada de balastro imbricado, para cada modelo de ensaio.

Quadro A 4 – Valores obtidos com o DIL.

#0G: topo do sub-balastro (TSB)			
Queda	Módulo de deformabilidade (MPa)	Força (kN)	Deflexão (µm)
1	98,88	15,24	595,23
2	103,73	15,20	565,73
3	106,76	15,17	548,62
4	107,91	15,38	550,59
5	106,70	15,20	550,00
6	105,57	14,85	543,13
7	108,96	15,17	537,80
8	110,59	15,26	533,08
9	114,56	15,40	519,27
10	113,04	15,24	520,67
Média	110,54	15,19	530,79

#0G: topo do balastro (TB)			
Queda	Módulo de deformabilidade (MPa)	Força (kN)	Deflexão (µm)
1	66,13	14,87	916,28
2	70,08	14,87	864,60
3	73,61	14,95	827,57
4	75,07	14,90	808,61
5	69,99	15,03	874,77
6	75,76	15,09	811,62
7	75,76	15,09	811,62
8	78,63	15,19	786,98
9	69,60	15,06	881,57
10	78,53	15,16	786,55
Média	75,66	15,12	815,67

#0G: topo camada de balastro imbricado (TBI)			
Queda	Módulo de deformabilidade (MPa)	Força (kN)	Deflexão (µm)
1	90,28	15,30	654,60
2	89,75	14,88	640,48
3	89,75	14,88	640,48
4	95,01	15,08	612,88
5	95,15	15,11	613,41
6	97,81	15,22	600,84
7	98,04	15,13	596,05
8	93,93	15,01	617,02
9	98,45	15,23	597,54
10	99,45	15,27	592,90
Média	97,54	15,17	600,87

#GT120/0: topo do sub-balastro (TSB)			
Queda	Módulo de deformabilidade (MPa)	Força (kN)	Deflexão (µm)
1	105,70	15,29	558,77
2	117,02	15,30	504,80
3	99,01	15,15	590,89
4	112,67	15,12	518,36
5	101,69	15,16	575,64
6	103,03	15,46	579,49
7	106,04	15,47	563,62
8	103,98	15,35	570,19
9	104,69	15,28	563,58
10	102,53	15,28	575,39
Média	104,05	15,37	570,45

#GT120/0: topo do balastro (TB)			
Queda	Módulo de deformabilidade (MPa)	Força (kN)	Deflexão (µm)
1	81,65	15,10	753,54
2	81,93	15,09	750,59
3	82,38	14,98	740,79
4	80,32	15,08	765,04
5	80,34	14,99	760,28
6	83,20	15,30	749,03
7	87,66	15,13	703,12
8	86,29	15,30	722,60
9	80,58	15,13	765,13
10	82,11	15,25	756,92
Média	83,97	15,22	739,36

#GT120/0: topo da camada de balastro imbricado (TBI)			
Queda	Módulo de deformabilidade (MPa)	Força (kN)	Deflexão (µm)
1	72,91	15,08	798,85
2	71,45	15,06	814,32
3	71,85	15,08	810,54
4	74,73	15,16	783,67
5	75,44	15,11	773,50
6	72,16	15,01	803,17
7	70,23	14,96	822,92
8	74,99	15,13	779,03
9	73,16	15,27	805,84
10	72,67	15,19	807,21
Média	72,64	15,11	803,63

#GT120/45_1: topo do sub-balastro (TSB)			
Queda	Módulo de deformabilidade (MPa)	Força (kN)	Deflexão (µm)
1	108,23	15,28	545,26
2	110,26	15,34	537,43
3	111,91	15,25	526,18
4	109,05	15,18	537,64
5	109,89	15,20	534,32
6	111,51	15,28	529,10
7	109,58	15,11	532,61
8	109,12	15,24	539,42
9	110,81	15,41	537,04
10	111,19	15,00	520,85
Média	110,44	15,21	531,80

#GT120/45_1: topo do balastro (TB)			
Queda	Módulo de deformabilidade (MPa)	Força (kN)	Deflexão (µm)
1	68,52	15,07	896,36
2	66,30	15,05	924,85
3	71,05	15,10	865,71
4	69,50	15,00	879,15
5	73,17	15,23	848,17
6	74,92	15,32	832,98
7	77,22	15,44	814,63
8	78,02	15,21	794,39
9	77,10	15,29	808,02
10	77,20	15,37	811,05
Média	76,89	15,33	812,21

#GT120/45_1: topo da camada de balastro imbricado (TBI)			
Queda	Módulo de deformabilidade (MPa)	Força (kN)	Deflexão (µm)
1	48,03	14,88	1196,65
2	47,75	14,84	1200,36
3	49,43	14,93	1166,34
4	48,79	14,99	1186,52
5	49,09	14,88	1170,42
6	48,14	14,76	1183,86
7	49,67	15,03	1169,06
8	50,37	14,58	1117,64
9	48,40	14,77	1178,28
10	49,61	14,59	1135,93
Média	49,24	14,74	1156,95

#GT120/45_2: topo do sub-balastro (TSB)			
Queda	Módulo de deformabilidade (MPa)	Força (kN)	Deflexão (µm)
1	108,66	15,27	542,80
2	107,52	15,10	542,41
3	107,64	15,25	547,24
4	110,60	15,72	549,09
5	111,23	15,57	540,79
6	110,08	15,52	544,49
7	111,99	15,68	540,87
8	109,94	15,36	539,65
9	109,75	15,54	546,87
10	112,58	15,62	535,92
Média	110,87	15,55	541,56

#GT120/45_2: topo do balastro (TB)			
Queda	Módulo de deformabilidade (MPa)	Força (kN)	Deflexão (µm)
1	79,55	15,53	795,38
2	79,74	15,45	789,15
3	80,53	15,50	784,08
4	80,48	15,53	786,18
5	81,88	15,60	776,00
6	82,25	15,43	764,18
7	82,46	15,47	764,36
8	82,67	15,65	771,30
9	83,89	15,47	751,47
10	84,93	15,43	740,47
Média	83,24	15,49	758,36

#GT120/45_2: topo da camada de balastro imbricado (TBI)			
Queda	Módulo de deformabilidade (MPa)	Força (kN)	Deflexão (µm)
1	48,15	14,49	1162,32
2	48,38	14,75	1177,41
3	49,33	14,91	1167,36
4	47,52	14,44	1173,73
5	47,59	14,10	1144,25
6	48,31	14,77	1181,18
7	52,07	15,30	1134,85
8	52,72	14,75	1080,88
9	50,35	14,60	1119,98
10	52,86	14,66	1071,26
Média	51,26	14,82	1117,63

